

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя  
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет інженерії машин, споруд і технологій  
(назва факультету)

Кафедра будівельної механіки  
(повна назва кафедри)

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітньо-наукового ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **Дослідження впливу вапнякового відсіву цукрового  
виробництва на міцність бетону**

Виконав(ла): студент(ка) 6 курсу, групи МБнм-6  
спеціальності 192

Будівництво та цивільна інженерія

(шифр і назва спеціальності)

Микитович А.А.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Ясній В.П.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Мещерякова О.М.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент Богуславська В.Ю.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Тернопіль

2026

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет Факультет інженерії машин, споруд і технологій  
(повна назва факультету)

Кафедра Будівельної механіки  
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Ясній В.П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

«    »                      2026 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітньо-наукового ступеня Магістр

(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 192 Будівництво та цивільна інженерія

(шифр і назва спеціальності)

студенту Андрію Андрійовичу Микитовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження впливу вапнякового відсіву цукрового виробництва на міцність бетону

Керівник роботи Володимир Петрович Ясній

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «09» квітня 2026 року № 4/9-178

2. Термін подання студентом завершеної роботи 20 травня 2026 року

3. Вихідні дані до роботи Результати літературного аналізу щодо використання вапнякових мінеральних добавок і кальцієвмісних відходів цукрового виробництва в цементних системах; вапняковий відсів цукрового виробництва як досліджуваний матеріал; бетонні зразки-куби розміром 100×100×100 мм; результати експериментальних випробувань міцності бетону на стиск при вмісті вапнякового відсіву 0, 5, 10 і 15 % від маси цементу.

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ; огляд літератури за темою використання вапнякового відсіву цукрового виробництва в бетоні; характеристика матеріалів і методика експериментальних досліджень; виготовлення бетонних зразків і випробування їх на стиск; аналіз результатів досліджень; економічне обґрунтування доцільності використання вапнякового відсіву; охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях; загальні висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

Таблиці складів бетонних сумішей; фото вапнякового відсіву, металевої опалубки та бетонних зразків; фото вологоміра Mastech MS6900 і преса Matest C104N із блоком керування Servo-Plus Evolution; графіки залежності міцності бетону від вмісту вапнякового відсіву; діаграми порівняння результатів контрольної та дослідних серій; слайди з основними результатами та висновками роботи.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Каспрук В.Б., к.т.н., доц		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	Стручок С.В., ст викл		
Нормоконтроль	Мещерякова О.М., ст викл		

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_ 10.04.2026 \_\_\_\_\_

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд літератури	17.04.2026	
2	Формулювання мети і поставлених задач досліджень	21.04.2026	
3	Виготовлення контрольних зразків	30.05.2026	
4	Дослідження бетонних зразків	08.05.2026	
5	Аналіз та опис одержаних результатів	15.05.2026	
6	Обґрунтування економічної ефективності виконаних досліджень	18.05.2026	
7	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	19.05.2026	
8	Загальні висновки	20.05.2026	

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Микитович А.А.  
\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

Ясній В.П.  
\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП .....</b>	<b>5</b>
<b>РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ.....</b>	<b>9</b>
1.1 Термінологія, походження та склад досліджуваного матеріалу .....	9
1.2 Локальна сировинна база Тернопільської області.....	10
1.3 Механізми впливу карбонатних тонкодисперсних матеріалів на міцність бетону .....	11
1.4 Наукові підходи до використання вапнякових мінеральних компонентів у цементах і бетонах .....	14
1.5 Стан досліджень кальцієвмісних відходів цукрового виробництва як компонентів цементних і бетонних композитів.....	16
1.6 Висновки до розділу 1 .....	21
<b>РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ .....</b>	<b>23</b>
2.1 Матеріали та методи досліджень.....	23
2.2 Підготовка вапнякового відсіву та виготовлення бетонних зразків.....	24
2.3 Методика випробування зразків на стиск .....	27
2.4 Обробка результатів експерименту.....	29
2.5 Висновки до розділу 2 .....	30
<b>РОЗДІЛ 3 РЕЗУЛЬТАТИ ТА АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ.....</b>	<b>31</b>
3.1 Характеристика експериментальних досліджень .....	31
3.2 Нормативна обробка результатів за ДСТУ Б В.2.7-214:2009 .....	33
3.3 Статистичний аналіз і порівняння серій .....	36
3.4 Порівняльний аналіз одержаних результатів .....	38
3.5 Механізм впливу добавок.....	40
3.6 Перспективи подальших досліджень .....	42
3.7 Висновки до розділу 3 .....	43
<b>РОЗДІЛ 4 ОБҐРУНТУВАННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОНАНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ .....</b>	<b>44</b>
4.1 Загальні положення щодо оцінювання загальної ефективності.....	44
4.2 Зниження матеріаломісткості бетонної суміші.....	44

4.3 Вплив на трудомісткість та технологічність .....	46
4.4 Потенційний вплив на експлуатаційний ресурс конструкцій .....	46
4.5 Узагальнення економічної ефективності.....	47
4.6 Висновки до розділу 4 .....	48
<b>РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ .....</b>	<b>49</b>
5.1 Охорона праці.....	49
5.1.1 Загальні положення з охорони праці під час виконання експериментальних досліджень.....	49
5.2 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих чинників .....	50
5.2.1 Підготовка сировини та дозування компонентів .....	50
5.2.2 Приготування бетонної суміші.....	50
5.2.3 Формування зразків у металевій опалубці .....	50
5.2.4 Визначення вологості вапнякового відсіву .....	51
5.2.5 Випробування зразків на стиск.....	51
5.3 Вимоги безпеки перед початком роботи .....	51
5.4 Вимоги безпеки під час виконання досліджень.....	52
5.5 Виробнича санітарія та захист від цементного пилу.....	52
5.6 Електробезпека, пожежна безпека та захист від шуму .....	53
5.7 Безпека в надзвичайних ситуаціях .....	53
5.7.1 Дії при ураженні електричним струмом .....	54
5.7.2 Дії при потраплянні цементу або розчину в очі .....	54
5.7.3 Дії при травмуванні уламками зразка .....	54
5.7.4 Дії при пожежі .....	54
5.8 Заходи щодо підвищення рівня безпеки під час подальших досліджень .....	55
5.9 Висновки за розділом 5 .....	55
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....</b>	<b>56</b>
<b>БІБЛІОГРАФІЯ.....</b>	<b>58</b>

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Сучасний розвиток будівельної галузі пов'язаний із потребою зниження матеріаломісткості бетонів, скорочення витрат цементу та ширшого використання місцевих вторинних матеріальних ресурсів. Одним із перспективних напрямів у цій сфері є застосування мінеральних відходів промислового походження як часткових заміників традиційних компонентів бетонної суміші. До таких матеріалів належить вапняковий відсів цукрового виробництва, який утворюється у значних обсягах і може розглядатися як потенційна мінеральна добавка для бетонів.

Актуальність теми зумовлена тим, що використання вапнякового відсіву цукрового виробництва дає змогу одночасно вирішувати кілька важливих завдань: зменшувати споживання цементу, знижувати собівартість бетонної продукції, скорочувати обсяги накопичення промислових відходів та підвищувати екологічну ефективність будівельного виробництва. Разом із тим наявні літературні джерела недостатньо висвітлюють питання впливу саме цього виду відходу на міцність звичайного важкого бетону, особливо з урахуванням місцевої сировинної бази та конкретних умов його використання.

Практична значущість теми полягає також у тому, що для Тернопільської області питання використання відходів цукрового виробництва має прикладний характер, оскільки в регіоні наявні підприємства, на яких утворюється вапняковий відсів. Отже, виконання такого дослідження є доцільним як з наукової, так і з виробничої точки зору.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Обраний напрям дослідження відповідає сучасним тенденціям розвитку будівельного матеріалознавства, зокрема пошуку ефективних способів використання техногенних і промислових відходів у виробництві будівельних матеріалів. Тематика роботи узгоджується з науково-дослідним напрямом кафедри будівельної механіки, пов'язаним із підвищенням ефективності будівельних

конструкцій, удосконаленням властивостей бетонів і раціональним використанням місцевої сировинної бази.

Робота також відповідає загальнодержавним і галузевим підходам до ресурсозбереження, енергоефективності, екологізації виробництва та повторного використання промислових відходів у будівництві. Отримані результати можуть бути використані при подальшому розробленні технологічних рішень щодо застосування вторинних мінеральних ресурсів у бетонних і цементних системах.

**Мета й задачі роботи.** Мета роботи полягає у встановленні характеру впливу вапнякового відсіву цукрового виробництва на міцність бетону та визначенні раціонального вмісту цієї добавки у складі бетонної суміші.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

1. проаналізувати наукові літературні джерела з питань використання вапнякових мінеральних добавок і кальцієвмісних відходів цукрового виробництва у цементних і бетонних системах;
2. охарактеризувати вапняковий відсів цукрового виробництва як досліджуваний матеріал та оцінити можливість його застосування у складі бетону;
3. розробити програму експериментальних досліджень із використанням бетонних зразків із різним вмістом вапнякового відсіву;
4. виготовити контрольні та дослідні бетонні зразки й провести їх випробування на стиск;
5. визначити міцність бетонів із різним вмістом вапнякового відсіву та проаналізувати отримані результати;
6. встановити раціональний вміст вапнякового відсіву цукрового виробництва у складі бетону;
7. обґрунтувати практичну та економічну доцільність використання вапнякового відсіву цукрового виробництва у бетонних сумішах.

**Об'єкт дослідження.** Об'єктом дослідження є бетон із додаванням вапнякового відсіву цукрового виробництва.

**Предмет дослідження.** Предметом дослідження є вплив вмісту вапнякового відсіву цукрового виробництва на міцність бетону при стиску.

**Методи дослідження.** Для досягнення поставленої мети у роботі використано комплекс взаємопов'язаних методів дослідження. На етапі опрацювання літературних джерел застосовано методи аналізу, узагальнення та порівняння наукових публікацій, що стосуються використання мінеральних добавок і техногенних відходів у бетонних системах. Експериментальну частину виконано методом лабораторного моделювання складів бетону з різним вмістом вапнякового відсіву. Міцність бетону визначали методом руйнівних випробувань контрольних зразків-кубів на стиск. Для обробки результатів використано порівняльний метод, метод усереднення експериментальних значень і нормативний підхід до оцінювання міцності серії зразків.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Полягає в тому, що:

- вперше для локального вапнякового відсіву цукрового виробництва Тернопільської області експериментально встановлено характер його впливу на міцність бетону при стиску;

- удосконалено підхід до оцінювання доцільного вмісту мінеральної добавки техногенного походження у складі бетону з урахуванням фактичної міцності контрольних зразків;

- отримало подальший розвиток уявлення про можливість використання кальцієвмісних відходів цукрового виробництва як мінеральної добавки до бетонних сумішей.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у можливості використання вапнякового відсіву цукрового виробництва як часткової заміни цементу у складі бетонної суміші. Отримані результати дають змогу рекомендувати раціональний вміст цієї мінеральної добавки для забезпечення достатньої міцності бетону без істотного ускладнення технології його виготовлення.

Практичне використання результатів дослідження може сприяти зниженню витрат цементу, зменшенню собівартості бетонної суміші, повторному

використанню місцевого промислового відходу, підвищенню екологічної ефективності виробництва бетонів.

Результати роботи можуть бути використані у подальших наукових дослідженнях, а також при розробленні складів бетонів із техногенними мінеральними добавками.

**Апробація результатів магістерської роботи.** Окремі результати роботи доповідались на ІХ Міжнародній студентській науково-технічній конференції молодих учених та студентів «Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання», Тернопіль, ТНТУ, 24-25 квітня 2026 р.

**Публікації.** Вплив попереднього натягу дротин із сплаву з пам'яттю форми на поведінку дослідної конструкції / М. Колісник, А. Микитович // Матеріали ІХ Міжнародної студентської науково-технічної конференції. — Тернопіль : ТНТУ, 2026. — С. 282–283.

**Ключові слова:** ВАПНЯКОВИЙ ВІДСІВ, ЦУКРОВЕ ВИРОБНИЦТВО, БЕТОН, МІЦНІСТЬ НА СТИСК, МІНЕРАЛЬНА ДОБАВКА, ТЕХНОГЕННИ ВІДХОДИ, ЦЕМЕНТ, БЕТОННІ ЗРАЗКИ.

## РОЗДІЛ 1

### ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

#### 1.1 Термінологія, походження та склад досліджуваного матеріалу

Для коректного використання літератури необхідно чітко розмежувати типи кальцієвих відходів, які фігурують у джерелах. У сучасній міжнародній літературі найчастіше трапляються терміни вапняковий порошок (limestone powder), вапняковий мікронаповнювач (limestone filler), цукрове вапно (sugar lime), вапняковий шлам (lime sludge), кальцієво-карбонатний шлам ( $\text{CaCO}_3$  sludge), фільтраційний осад (filter mud) або фільтраційний кек (filter cake). У європейській та американській практиці вапняковий порошок зазвичай означає тонкомелений вапняк або карбонатний порошок стабільного складу, що вводиться до цементної системи як компонент цементу або як мінеральна добавка [1, 2, 7]. Для таких матеріалів характерні висока частка  $\text{CaCO}_3$ , контрольована тонкість помелу та відносно низький вміст органічних домішок.

Натомість відходи цукрового виробництва походять не лише від дроблення і сортування вапняку, а й від стадій вапнування, сатурації, фільтрації та очищення сиропу. У роботі O. Jantasuto та N. Wiwattanachang показано, що кальцієво-карбонатний шлам, пов'язаний із цукровим виробництвом, може містити істотну кількість  $\text{CaO}$ , тоді як вміст  $\text{SiO}_2$  та  $\text{Al}_2\text{O}_3$  у ньому є значно меншим, ніж у портландцементі; при цьому навіть відносно невелика кількість залишкового цукру помітно змінює строки тужавлення і поведінку суміші [12]. Це принципово важливий висновок: для цукрових відходів вирішальним є не лише «карбонатний» характер, а й ступінь очищення від органіки. Саме тому література, де цукровий шлам показав зниження міцності, не суперечить працям, де тонкий вапняковий порошок дав приріст міцності: мова часто йде про матеріали з різною чистотою і дисперсністю.

Для українського контексту корисним є те, що офіційний регіональний план управління відходами Тернопільської області фіксує дефекат і вапняковий відсів як окремі позиції. Для Збараського МПД ТОВ «Радехівський цукор» наведені

окремо дефекат і відсів вапняковий, тобто на практиці підприємство розрізняє ці два потоки відходів [17].

Також відомі українські дослідження стосовно складу карбонатних відходів з каменерізання та дроблення карбонатних порід. У дослідженні В. П. Очеретного, В. П. Ковальського та А. В. Бондаря наведено склад карбонатного (вапнякового) заповнювача з відходів кар'єрів:  $\text{CaCO}_3$  90,7–95,8 %,  $\text{MgCO}_3$  1,4–4,3 %,  $\text{SiO}_2$  0,4–7,15 %,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  0,08–1,08 % [16]. Хоча ці відходи не є продуктом саме цукрового виробництва, вони показують, що технологічний вапняковий відсів може бути не «хімічно чистим кальцитом», а матеріалом зі змінним вмістом силікатних і глинистих домішок. Для бетону це має подвійне значення: з одного боку, такі домішки можуть впливати на витрату води та контактну зону; з іншого — невелика кількість  $\text{SiO}_2$  та  $\text{Al}_2\text{O}_3$  потенційно підсилює структуроутворення в карбонатно-цементній системі.

Отже, у вузькому сенсі найраціональніше трактувати вапняковий відсів цукрового виробництва як тонкодисперсний або дрібнофракційний кальцієво-карбонатний матеріал техногенного походження, відокремлений від дефекату і охарактеризований за гранулометриєю, вологістю, хімічним та, за можливості, мінералогічним складом. Це є важливим уточненням для подальшого порівняння та аналізу літератури.

## 1.2 Сировинна база Тернопільської області

Локальна прив'язка є однією з сильних сторін запропонованої теми. Регіональний план управління відходами Тернопільської області свідчить, що на майданчиках ТОВ «Радехівський цукор» обліковуються не лише традиційні відходи цукрового виробництва, а й окремо вапняковий відсів. Для Чортківського МПД за 2019 рік зафіксовано понад 1,8 тис. т вапнякового відсіву, для Хоростківського МПД — близько 1,6 тис. т, а для Збаразького МПД — наявність відсіву вапнякового в запасі й окремо дефекату [17]. Це означає, що дослідження не є штучно сконструйованим під доступний у лабораторії матеріал: у регіоні

реально існує відносно стабільний потік відходу, який потенційно може бути залучений у виробництво місцевих бетонів, розчинів або сухих сумішей.

Для магістерської роботи це відкриває можливість сформулювати практично значущу задачу, а саме, визначити, у яких межах саме техногенний локальний відсів може заміщати частину цементу або дрібного заповнювача без втрати міцності. У цьому полягає основний прикладний сенс огляду літератури: обґрунтувати параметри майбутньої програми випробувань і виявити фактори, які не можна ігнорувати.

### **1.3 Механізми впливу карбонатних тонкодисперсних матеріалів на міцність бетону**

У міжнародній літературі практично склався консенсус щодо того, що вплив тонкодисперсного вапняку на міцність бетону є результатом одночасної дії кількох механізмів, а не одного «хімічного» або одного «фізичного» ефекту. У роботі D. Wang та співавторів ці механізми описані як ефект мікронаповнення (filler effect), нуклеаційний ефект (nucleation effect), ефект розбавлення (dilution effect) і хімічний ефект (chemical effect) [1]. Такий підхід є актуальним і для аналізу вапнякового відсіву цукрового виробництва, за умови, що він попередньо висушений, подрібнений і диспергований до фракції, що реально бере участь у формуванні структури цементного каменю.

Перший механізм — ефект мікронаповнення, або ущільнення зерен. Дрібні карбонатні частинки заповнюють міжзернові порожнини між частками цементу і тонкого заповнювача, зменшують капілярну пористість і сприяють формуванню щільнішої матриці [1, 4, 6]. Особливо виразно цей ефект проявляється тоді, коли розмір частинок вапнякової добавки є меншим або співмірним із розміром найдрібніших фракцій цементу. У праці J. Sun і Z. Chen показано, що за певних співвідношень вода/в'язуче використання вапнякового порошку може забезпечити більш компактну мікроструктуру і прийнятну стійкість до сульфатної дії та проникнення хлоридів за умови визначення міцності на 28 добу [6]. У роботі C. Li

та L. Jiang також підтверджено, що вапняк зменшує частку великих капілярних пор і ущільнює мікроструктуру шлакового бетону [4].

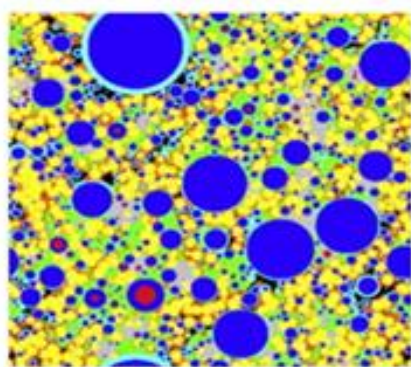
Другий механізм — нуклеаційний. Частинки  $\text{CaCO}_3$  можуть бути центрами осадження продуктів гідратації, насамперед C-S-H гель. Це означає, що в ранні строки твердіння вони не просто пасивно «сидять» у матриці, а прискорюють розвиток структури, зменшуючи енергетичний бар'єр для кристалізації гідратів [1, 4, 7]. Саме цим часто пояснюється той факт, що помірні кількості тонкого вапняку підвищують ранню міцність. У праці Li і Jiang для шлакового бетону додавання до 10 % вапнякового порошку дало виразний приріст ранньої міцності, який автори прямо пов'язують із ефектами зародження та наповнення [4]. Для практики це означає, що вапняковий відсів потенційно може бути корисним не лише як дешевий інертний компонент, а й як регулятор темпу набору міцності — за умови достатньої тонкості помелу.

Третій механізм — хімічний. Хоча вапняк традиційно вважають матеріалом низької реакційної здатності, сучасні дослідження показали, що карбонатна фаза не є повністю інертною щодо цементної системи. За наявності алюмінатних фаз цементу частина карбонату кальцію вступає у взаємодію з утворенням карбоалюмінатних фаз (carboaluminate phases), які можуть стабілізувати гідратні новоутворення і змінювати фазовий склад матриці [1, 6, 7]. У звіті Американської цементної асоціації зазначено, що порівнювана або навіть краща експлуатаційна поведінка портланд-вапнякового цементу досягається саме через комбінацію ефектів ущільнення зернового складу (packing effect), нуклеаційного ефекту (nucleation effect) і реакції кальцію карбонату з алюмінатними фазами з утворенням кальцієвих карбоалюмінатів [7]. Для звичайного вапнякового порошку цей ефект помірний, але для тонкого матеріалу з високою питомою поверхнею він уже не може ігноруватися.

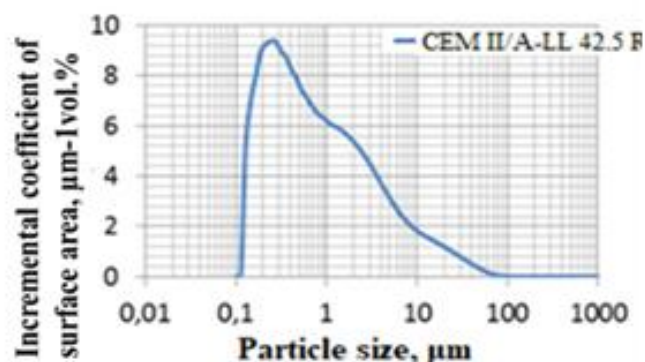
Четвертий механізм це ефект розбавлення. Він визначає верхню межу корисного використання карбонатної добавки. Якщо частка заміщення цементу стає надто високою, позитивний вплив ефекти мікронаповнення і нуклеації (filler/nucleation) уже не компенсує втрату клінкерної частини, яка є головним

носієм пізньої міцності. У результаті пізня міцність починає знижуватися, а система стає чутливішою до режиму твердіння (curing regime) та водов'язучого відношення [1, 6]. У роботі Qi та співавторів на морському кораловому бетоні оптимальні механічні властивості спостерігали за помірного вмісту вапнякового порошку, при подальшому збільшенні дозування відбувалося зниження міцності [3]. Аналогічна тенденція простежується і в роботі Chang та співавторів: невеликі або середні кількості вапнякового порошку можуть покращувати міцність, але результат суттєво залежить від того, чим саме заміщується матеріал — цементною частиною чи грубішою дрібною фракцією піску [5].

Окремо слід наголосити на ролі дисперсності. Майже всі праці, де зафіксовано позитивний вплив вапняковий порошку на міцність, підкреслюють, що тонкість помелу є не менш важливою, ніж відсоток заміни [1, 3, 4].



a



b

Рисунок 1.1 – Модель розподілу клінкерних і вапнякових частинок та внесок фракцій у питому поверхню цементної системи [13]

Разом з вищезазначеним, важливим також є і режим введення добавки. У частині досліджень вапняковий порошок заміщує цемент, у частині — дрібний заповнювач (fine aggregate), а в частині виступає окремим мінеральним наповнювачем без прямого пропорційного зменшення цементу. Ці схеми принципово різні за наслідками. Коли карбонатний матеріал заміщує цемент, на перший план виходить небезпека ефекту розбавлення (dilution effect), тому

оптимальні дози зазвичай нижчі. Коли ж вапняковий порошок частково заміщує грубіші фракції дрібного заповнювача, можна отримати покращення щільності упаковки зерен (packing density) без настільки сильного зменшення вмісту клінкеру [5]. Для теми про вапняковий відсів цукрового виробництва це особливо актуально: такий матеріал може виявитися більш доцільним не як «замінник цементу», а як поліфункціональний тонкий наповнювач або модифікатор гранулометрії дрібного заповнювача.

Нарешті, для цукрових відходів діє ще один механізм — негативний вплив органічних залишків. Якщо матеріал містить залишковий цукор або інші органічні компоненти, вони здатні сповільнювати гідратацію, підвищувати водопотребу й знижувати міцність при сталому водоцементному відношенні [12]. Саме тому література щодо відходів цукрового вапна (sugar-lime residues) є суперечливішою, ніж література щодо чистого комерційного вапнякового порошку (commercial вапняковий порошок). Висновок тут очевидний: перед випробуванням місцевого вапнякового відсіву цукрового виробництва обов'язкові хімічний аналіз, визначення втрати при прожарюванні, вологості, вмісту розчинних органічних домішок і гранулометричного складу.

#### **1.4 Наукові підходи до використання вапнякових мінеральних компонентів у цементах і бетонах**

Міжнародні наукові дослідження впродовж двадцяти років підтверджують, що тонкий вапняковий порошок перестав розглядатися винятково як «баласт». Його включення до складу цементу та бетону стало частиною стратегії декарбонізації галузі. Стандарт ASTM C595 прямо допускає змішані гідравлічні цементи (blended hydraulic cements) із використанням вапнякового порошку як одного з основних компонентів [18], а Американська асоціація цементу вказує, що портланд-вапняковий цемент (Portland-limestone cement, PLC) містить 5–15 % вапняку і забезпечує подібні експлуатаційні характеристики за приблизно на 10 % нижчого вуглецевого сліду порівняно зі звичайним портландцементом [19]. Отже,

сучасна нормативна база не тільки не забороняє використання карбонатної складової, а фактично нормалізує її присутність у цементній системі.

Разом із тим стандарти не відповідають на питання про поведінку саме техногенних відходів. Тому ключовими є експериментальні праці. Одна з найважливіших для розуміння механізму — робота Li і Jiang про вапняковий порошок як активатор ранньої міцності шлакового бетону [4]. Автори показали, що додавання вапняковий порошок значно підвищує ранню міцність, знижує вуглецевий слід і вологісну усадку, а також робить мікроструктуру щільнішою завдяки зменшенню частки великих капілярних пор. У їхньому дослідженні саме додавання 10 % вапнякового порошку дало найкращий баланс між міцністю, екологічним ефектом і собівартістю. Це підтверджує актуальність теми оскільки демонструє принцип, що кальцієво-карбонатний тонкий матеріал особливо корисний у системах, де є повільніший або менш активний компонент, наприклад шлак.

У дослідженні Qi та співавторів, присвяченому бетону на кораловому заповнювачі із застосуванням морської води, встановлено, що оптимальні показники міцності досягалися за вмісту вапнякового порошку в межах 16–20 %, тоді як подальше збільшення його кількості супроводжувалося зниженням позитивного ефекту [3]. Хоча це досить специфічний тип бетону, робота актуальна тим, що ще раз підтверджує важливість збалансованого хімічного складу.

Окремий напрям досліджень пов'язаний з аналізом мікроструктури та довговічності бетону. Sun і Chen показали, що за сталого водов'язучого відношення надмірне збільшення вмісту вапнякового порошку погіршує стійкість бетону до сульфатної корозії та проникнення хлоридів. Водночас за зниженого водов'язучого відношення і контрольованої 28-добової міцності бетон навіть із 24 % вапнякового порошку може демонструвати властивості, близькі до звичайного бетону на портландцементі [6]. Найважливіший практичний висновок із цієї роботи полягає в тому, що карбонатні добавки не можна оцінювати поза контекстом водов'язучого відношення та режим твердіння (curing regime). Якщо вапняковий

відсів підвищить водопотребу суміші, то навіть потенційно корисний ефект мікронаповнення може бути нівельований зростанням витрат води та цементу.

Загальний звіт Американської асоціації цементу синтезує десятиліття досліджень PLC і наголошує, що порівнювана експлуатаційна поведінка можлива за умови контролю тонкості (fineness) та хімії (chemistry) [7]. Якщо локальний відсів нестабільний за складом або містить небажані домішки, позитивні вищезгадані ефекти в цьому розділі можуть не відтворитися. Якщо ж матеріал стабілізувати сушінням, подрібненням і класифікацією, ймовірність отримати конструктивно корисний результат значно підвищується.

Отже, на основі аналізу літератури по вапняковому порошку можна сформулювати чотири робочі положення. По-перше, помірні дози тонкого карбонатного матеріалу здатні покращувати ранню, а інколи і 28-добову міцність. По-друге, ключову роль відіграє дисперсність. По-третє, оптимум залежить від схеми заміщення: цемент, дрібний заповнювач або комбінована схема. По-четверте, вплив добавки слід оцінювати комплексно, а саме з урахуванням легкоукладальності, водопотреби та мікроструктури, а не лише за єдиним показником міцності на стиск.

### **1.5 Стан досліджень кальцієвмісних відходів цукрового виробництва як компонентів цементних і бетонних композитів**

Прямі дослідження кальцієвих відходів цукрового виробництва значно менш однорідні, ніж праці про вапняковий порошок загального призначення. Причина проста: цукрові відходи різняться між країнами і навіть між заводами за способом очищення соку, складом сировини, режимом сатурації, ступенем фільтрації та кількістю органічних залишків.

Одним із найважливіших джерел є стаття Li, Xu, Yang та Wu про підготовку портландцемент із цукрового фільтраційного осаду [11]. Це дослідження не стосується безпосередньо важкого бетону, але воно принципово доводить, що відходи цукрового виробництва можуть розглядатися як кальцієвмісна мінеральна

сировина для цементної галузі. Сам факт, що фільтраційний осад (filter mud) уведено в цементну сировинну суміш, означає що такі відходи з точки зору хімії, можуть бути використані для цементу. Разом із цим автори показали, що надмірне введення фільтраційного осаду є небажаним — через домішки і вплив на формування клінкерних фаз.

Інший важливий напрям – це праці, що присвячені безпосередньо кальцієво-карбонатному шламу ( $\text{CaCO}_3$  sludge) з цукрового виробництва. Дослідження Jantasuto і Wiwattanachang [12] продемонструвало, що заміна частини портландцементу шламом може сповільнювати тужавлення та знижувати міцність, якщо там залишається цукор. Автори фактично показали два сценарії поведінки матеріалу: у «сирому» стані з цукром він діє як ретардер і погіршує міцність, у промитому або очищеному — стає більш придатним для мінерального заміщення. Ця робота особливо цінна для формування дизайну експерименту: якщо місцевий вапняковий відсів має контакт із технологічними потоками цукру, до обов'язкових попередніх процедур потрібно включити перевірку на водорозчинні органічні домішки.

Нова хвиля досліджень 2024–2025 років перевела тему цукрових кальцієвих відходів у площину малоклінкерних в'язучих (low-clinker binders) та лужноактивованих матеріалів (alkali-activated materials). У дослідженні Murali та співавторів перероблений вапняковий шлам застосовано як кальцієво-карбонатну сировину для формування малоклінкерного цементного в'язучого [10]. Автори встановили, що поєднання 15 % переробленого вапнякового шламу з 30 % кальцинованої глини забезпечує сприятливий перебіг реакцій гідратації та, для окремих складів, високі показники міцності після 28 доби. При цьому важливим є не лише сам позитивний результат, а й висновок про синергійну дію кальцієвого шламу та алюмосилікатного компонента.

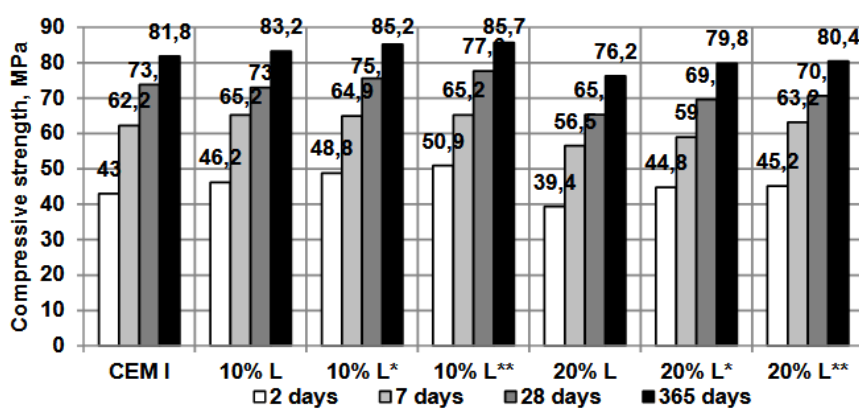
Ще більш показовою є робота Bahmani та Mostofinejad, у якій вапняковий відхід цукрового виробництва після високотемпературної обробки застосовано для активації шлаку у високоміцному бетоні. За даними авторів, додавання 10 % такого вапнякового відходу забезпечило міцність на стиск на рівні близько 80 МПа, а

також високі показники міцності на розтяг і вигин. Важливо розуміти, що в цьому випадку йдеться не про звичайний бетон із частковою заміною цементу вапняковим відсівом. Тут вапняковий відхід використовується як активатор у складнішій багатокомпонентній системі. Проте для огляду літератури ця праця є надзвичайно цінною, оскільки вона доводить, що належно підготовлений кальцієвмісний відхід цукрового походження може не лише не послаблювати цементну систему, а й виконувати функцію активного компонента.

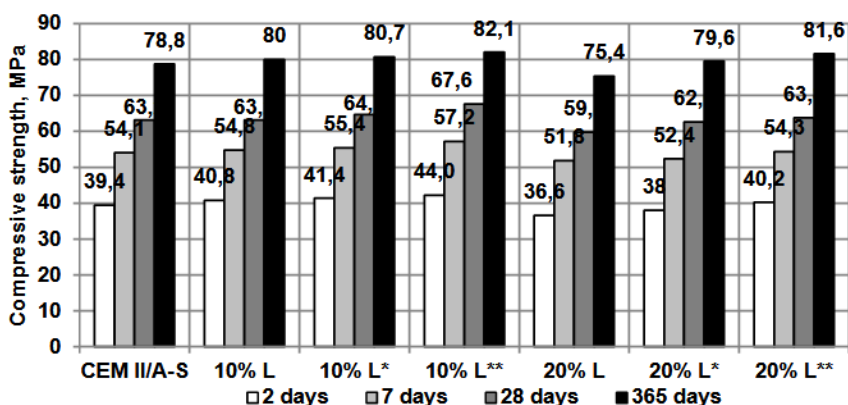
У роботі El Fadili та співавторів цукрове вапно досліджено у складі двокомпонентних і трикомпонентних лужно-активованих матеріалів разом із золою-винесення та глинистим фосфатним шламом. Автори зафіксували зростання міцності на стиск зі збільшенням вмісту реакційноздатного кальцію, однак показали, що після досягнення певної межі, коли вміст цукрового вапна перевищував 8 %, приріст міцності сповільнювався або переходив у спад. Це є ще одним незалежним підтвердженням існування оптимального вмісту кальцієво-карбонатного відходу. Примітно, що автори безпосередньо пов'язують розвиток міцності з участю активного кальцію у формуванні гелів C–S–H та C–A–S–H. Хоча лужно-активовані системи не є тотожними звичайному бетону на портландцементі, сам механістичний висновок про те, що активний кальцій є корисним лише до певної межі, є цілком релевантним.

Загалом міжнародні праці про цукрове вапно і вапняковий шлам дозволяють зробити кілька висновків, важливих саме для дослідження вапнякового відсіву цукрового виробництва: 1) кальцієві відходи цукрового походження не можна автоматично вважати інертними; у правильно організованих системах вони можуть бути активним або принаймні функціональним компонентом в'язучого [8–10]; 2) наявність залишкового цукру й органіки є критичним фактором ризику, здатним збільшувати строки тужавлення і знижувати міцність [12]; 3) найкращі результати часто досягаються не при високих, а при помірних рівнях заміщення або активації [8–10]; 4) синергія з шлаком, метакаоліном, кальцинованою глиною та іншими алюмосилікатними компонентами може виявитися сильнішою, ніж однофакторне введення кальцієвого відходу [8–10].

У статті Т. Кропивницької та ін. досліджено вплив вапнякового порошку на композиційні властивості портландцементів [13]. Автори встановили, що часткова заміна клінкеру тонкомеленим вапняком у цементах типу СЕМ ІІ, орієнтованих на практичне застосування, є не лише екологічно доцільною, а й технологічно обґрунтованою. При цьому тонкодисперсний вапняк у портланд-композиційних цементах зі шлаком сприяє повнішому прояву синергійної взаємодії компонентів і забезпечує технічні, екологічні та економічні переваги у виробництві збірного й монолітного залізобетону. Для теми даної роботи це є важливим підтвердженням того, що вапнякова складова може ефективно використовуватися в цементних системах без втрати, а в окремих випадках — із підвищенням ранньої міцності.



a



b

Рисунок 1.2 – Міцність на стиск дрібнозернистих бетонів на основі цементів СЕМ І (а) та СЕМ ІІ/А-С (б) із введенням вапняку різної дисперсності [13]

Наступною важливою працею є стаття О. Рихліцької та Т. Кропивницької, у якій досліджено властивості товарного бетону на основі портланд-вапнякового цементу [14]. Автори встановили, що застосування сучасних полікарбоксилатних суперпластифікаторів забезпечує суттєвий водоредукувальний ефект і дає можливість отримувати бетон класу С45/55. Для тематики даної роботи цей результат має важливе практичне значення, оскільки підтверджує, що карбонатну складову цементної системи слід розглядати у взаємозв'язку з хімічними модифікаторами бетонної суміші. У разі, якщо вапняковий відсів цукрового виробництва характеризуватиметься підвищеною водопотребою, використання полікарбоксилатного суперпластифікатора слід вважати не додатковим, а необхідним чинником забезпечення його позитивного структуроутворювального впливу.

У роботі А. В. Бондаря встановлено, що введення тонкоподрібнених мінеральних порошків карбонатної природи впливає на міцність на стиск і середню густину поризованих розчинів, а використання тонкодисперсного вапнякового мікронаповнювача сприяє підвищенню експлуатаційних властивостей систем на основі сухих будівельних сумішей [15]. Незважаючи на те, що дослідження присвячене не важким бетонам, а поризованим розчинам, воно є методологічно цінним. З одного боку, ця праця підтверджує, що відходи карбонатних порід українського походження доцільно розглядати не як випадкові наповнювачі, а як технологічно керовані модифікатори структури. З іншого боку, вона акцентує увагу на вирішальному значенні тонкоподрібненого стану матеріалу.

Ще детальніше характеристики карбонатного заповнювача з відходів вапняку наведено у праці Очеретного та ін. [16]. Для вапнякового порошку з відходів карбонатних порід автори подають не лише хімічний склад, а й фізичні властивості матеріалу.

У ширшому плані українські дослідження підтверджують три важливі положення. По-перше, вапнякова тонкодисперсна складова добре інтегрується в сучасні цементу типу СЕМ II та в товарний бетон [13, 14]. По-друге, відходи карбонатної природи в Україні розглядаються як реальний ресурс для будівельних

матеріалів, а не лише як об'єкт утилізації [15, 16]. По-третє, технологічний ефект таких матеріалів виявляється повніше тоді, коли вони дисперсні, дозовані й введені в систему з контрольованим водов'язучим відношенням.

Разом із тим українська література демонструє і прогалину. Переважно досліджують комерційний вапняковий порошок, карбонатні відходи каменерізання й подрібнення порід, або сухі суміші та поризовані розчини. Прямих робіт саме про вапняковий відсів цукрового виробництва як компонент важкого бетону практично немає.

## 1.6 Висновки до розділу 1

Проведений огляд літератури показує, що тема використання вапнякового відсіву цукрового виробництва у бетоні є науково обґрунтованою та практично актуальною, хоча кількість прямих джерел, присвячених саме цьому матеріалу, залишається обмеженою. Найбільш вагоме теоретичне підґрунтя для цієї теми формує міжнародна література, присвячена вапняковому порошку, вапняковому мікронаповнювачу та портланд-вапняковому цементу, у якій стабільно підтверджуються ефекти ущільнення зернового складу, нуклеації продуктів гідратації та часткової хімічної взаємодії карбонатної фази з алюмінатними компонентами цементу [1–7]. Саме ці механізми пояснюють, чому помірні кількості тонкодисперсного вапняку здатні підвищувати ранню, а в окремих системах і 28-добову міцність бетону.

Прямі дослідження цукрового вапна, вапнякового шламу, кальцієво-карбонатного шламу та фільтраційного осаду уточнюють, що кальцієвмісні відходи цукрового походження можуть бути як корисними, так і проблемними компонентами цементних систем. Їх позитивний ефект проявляється за умови належної підготовки, оптимального дозування та, часто, синергійної взаємодії з іншими мінеральними компонентами [8–12]. Негативні результати найчастіше пов'язані з наявністю залишкової органіки, підвищеною водопотребою або надмірним заміщенням цементу.

Українська література підтверджує, що вапнякова складова ефективно використовується як у портланд-композиційних цементах, так і в бетонах і сухих будівельних сумішах, а карбонатні відходи місцевого походження розглядаються як реальна технологічна сировина [13–16]. Офіційні дані щодо Тернопільської області додатково підтверджують наявність регіональної сировинної бази для виконання такого дослідження [17].

Основна наукова прогалина полягає в тому, що наявна література поки не дає достатньо даних саме про вапняковий відсів цукрового виробництва як компонент звичайного важкого бетону. Із цього випливає практичне значення майбутньої магістерської роботи, яке полягає у встановленні складу, оптимального вмісту, способу введення та характеру впливу локального техногенного матеріалу на міцність бетону.

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 2.1 Матеріали та методи досліджень

Експериментальні дослідження спрямовані на встановлення впливу вапнякового відсіву цукрового виробництва на міцність бетону при стиску. Програму досліджень розроблено таким чином, щоб у однакових умовах порівняти міцність контрольного бетону та бетонів, модифікованих різною кількістю мінеральної добавки.

Змінним фактором у дослідженні приймали вміст вапнякового відсіву цукрового виробництва, який становив 0, 5, 10 і 15 % від маси цементу. До сталих факторів належали вид цементу, тип дрібного і крупного заповнювачів, розміри зразків, умови формування, режим твердіння та методика випробування на стиск.

Для виготовлення бетонних сумішей використовували портландцемент, воду, пісок, крупний заповнювач у вигляді щебеню та вапняковий відсів цукрового виробництва. Як дослідні зразки приймали бетонні куби розміром 100×100×100 мм.

Програма експерименту передбачала формування чотирьох серій зразків: контрольної серії без добавки та трьох дослідних серій із частковою заміною цементу вапняковим відсівом у кількості 5, 10 і 15 %. Для кожного складу виготовляли по три зразки, а за результат дослідження приймали середнє значення міцності відповідної серії.

Випробування всіх бетонних зразків проводили на 28-му добу після заливання суміші у форми та її твердіння. Такий строк прийнято як нормативний вік бетону для оцінювання міцності за контрольними зразками із встановленням класу бетону відповідно до чинних національних стандартів та державних будівельних норм.

Таблиця 2.1 – Програма експериментальних досліджень

Серія	Вміст відсіву, % від маси цементу	Кількість зразків	Розміри зразків, мм
K0	0	3	100×100×100
K5	5		
K10	10		
K15	15		

Отже, у межах даного етапу було виготовлено 12 кубічних зразків. Така кількість забезпечує можливість отримання репрезентативних результатів та зменшує вплив випадкових відхилень окремих значень міцності.

## 2.2 Підготовка вапнякового відсіву та виготовлення бетонних зразків

Перед приготуванням бетонних сумішей усі матеріали підлягали попередній підготовці. Цемент, пісок і щебінь дозували у встановлених кількостях, а вапняковий відсів попередньо перевіряли на вологість, оскільки фактичний вміст води безпосередньо впливає на правильність дозування та на водов'язуче відношення суміші.

Вологість вапнякового відсіву цукрового виробництва визначали за допомогою вологоміра Mastech MS6900. Вимірювання виконували на двох протилежних гранях у 18 точках для кожного зразка, після чого встановлювали середнє значення вологості. Отримані дані враховували під час підготовки матеріалу до замішування.



Рисунок 2.1 – Визначення вологості вапнякового відсіву вологоміром Mastech MS6900

Контрольний склад бетону приймали без добавки. У дослідних серіях частину цементу замінювали вапняковим відсівом у кількості 5, 10 і 15 % від його маси. Такий підхід давав змогу оцінити безпосередній вплив мінеральної добавки на структуру цементного каменю та зміну міцності бетону.

Бетонну суміш готували в лабораторних умовах. Спочатку сухо перемішували цемент, вапняковий відсів, пісок і щебінь до однорідного стану, після чого поступово вводили воду замішування і продовжували перемішування до утворення рівномірної бетонної суміші.

Підготовлену суміш заливали у металеву опалубку, призначену для одночасного формування трьох кубічних зразків розміром 100×100×100 мм. Укладання виконували пошарово з подальшим ущільненням суміші, щоб забезпечити щільне заповнення форми та зменшити кількість повітряних пор.



Рисунок 2.2 – Металева опалубка для одночасного формування трьох кубічних зразків

Після заповнення форм верхню поверхню вирівнювали. Зразки залишали у формах на початковий період твердіння, а після розпалублення витримували в однакових умовах до досягнення віку 28 діб. Для всіх серій забезпечували однаковий режим твердіння, що було необхідною умовою коректного порівняння результатів.



Рисунок 2.3 – Бетонні куби серій 0, 5, 10 та 15 % перед випробуванням

### 2.3 Методика випробування зразків на стиск

Випробування бетонних зразків на стиск проводили на автоматизованому випробувальному пресі Matest C104N, оснащеному блоком керування Servo-Plus Evolution. Застосування цього обладнання забезпечило можливість плавного прикладання навантаження, стабільний режим роботи та надійну фіксацію максимального руйнівного зусилля.

Перед початком випробування перевіряли технічний стан преса, правильність розміщення натискних плит і працездатність системи керування. Кожний зразок очищали від забруднень, візуально оглядали, а після цього встановлювали по центру нижньої плити для забезпечення рівномірного передавання зусилля на всю площу стиску.

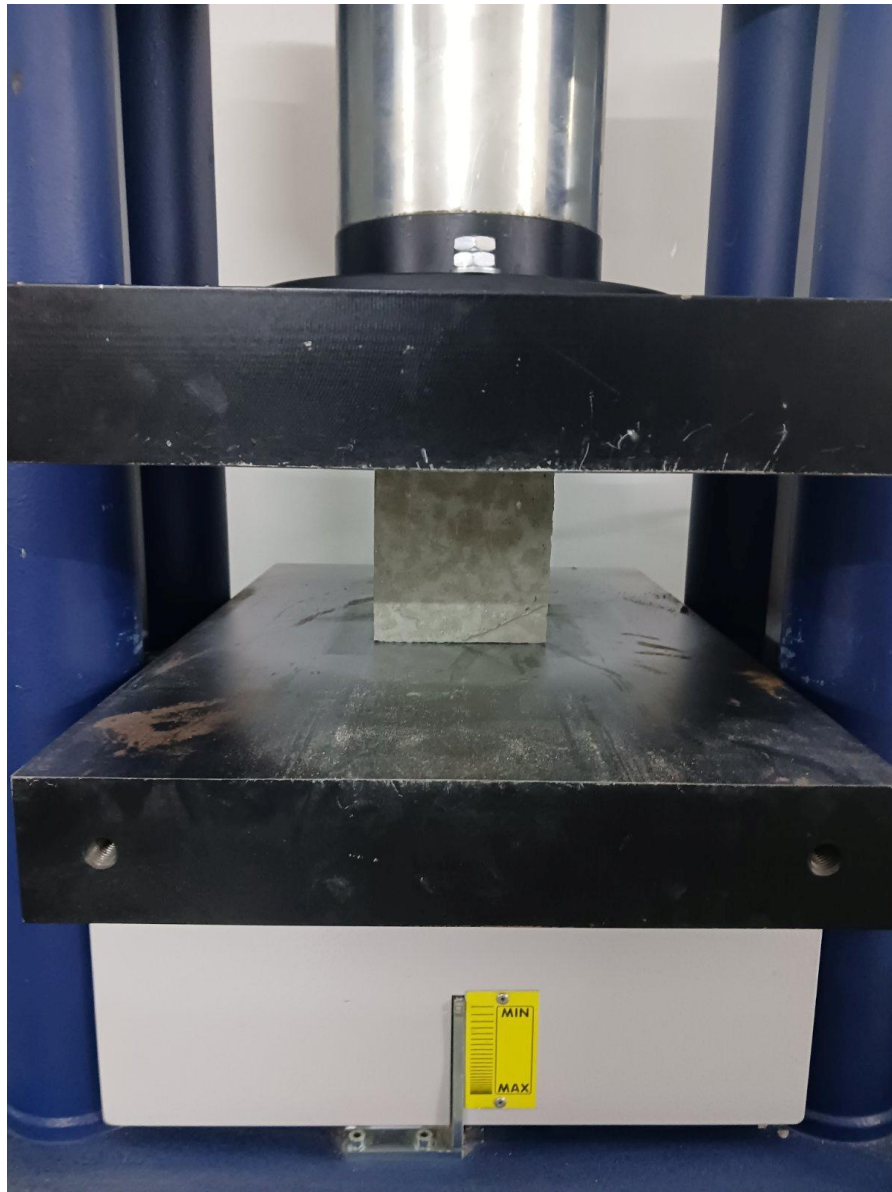


Рисунок 2.4 – Випробування бетонного куба на стиск на пресі Matest C104N

Міцність бетону визначали руйнівним методом шляхом стиску контрольних зразків до моменту повного руйнування. Під час випробування навантаження прикладали безперервно до фіксації максимального значення, після чого за отриманим руйнівним зусиллям обчислювали міцність бетону на стиск.

Оскільки всі дослідні зразки випробовували у віці 28 діб, отримані значення характеризують нормативну міцність бетону у стандартному віці твердіння, прийнятому для оцінювання міцності за контрольними зразками.

## 2.4 Обробка результатів експерименту

Міцність окремого зразка на стиск визначали як відношення руйнівного навантаження до площі поперечного перерізу куба:

$$f_c = P / A \quad (2.1)$$

де  $f_c$  – міцність бетону на стиск, МПа;  $P$  – руйнівне навантаження, Н;  $A$  – площа поперечного перерізу зразка, мм<sup>2</sup>.

Для кубів розміром 100×100×100 мм площу поперечного перерізу приймали сталою:

$$A = 100 \cdot 100 = 10000 \text{ мм}^2$$

Якщо руйнівне навантаження фіксували у кілоньютонах, для оперативного обчислення міцності користувалися спрощеним співвідношенням:

$$f_c = 0,1 \cdot P \quad (2.2)$$

де  $P$  – руйнівне навантаження, кН.

Для кожної серії з трьох зразків визначали середнє значення міцності:

$$f_{cm} = (f_{c1} + f_{c2} + f_{c3}) / 3 \quad (2.3)$$

Після цього середню міцність дослідних серій порівнювали з контрольною та визначали відносну зміну міцності залежно від вмісту вапнякового відсіву:

$$\Delta f = ((f_{cm,i} - f_{cm,0}) / f_{cm,0}) \cdot 100 \% \quad (2.4)$$

де  $f_{cm,i}$  – середня міцність дослідної серії;  $f_{cm,0}$  – середня міцність контрольної серії.

Крім числових значень руйнівного навантаження, під час аналізу враховували і характер руйнування кубів, оскільки форма руйнування дає додаткову інформацію про щільність структури бетону, рівномірність розподілу компонентів та якість ущільнення суміші. Отримані результати заносили до журналу випробувань, після чого виконували їх порівняльний аналіз і графічне узагальнення.

## **2.5 Висновки до розділу 2**

У розділі сформовано методику експериментального дослідження впливу вапнякового відсіву цукрового виробництва на міцність бетону. Програмою випробувань передбачено чотири серії кубічних зразків розміром  $100 \times 100 \times 100$  мм: контрольну серію без добавки та три дослідні серії із заміною частини цементу вапняковим відсівом у кількості 5, 10 і 15 %.

Уточнено порядок підготовки матеріалів, визначення вологості відсіву, приготування бетонної суміші, формування зразків у металевій опалубці на три куби, режиму твердіння та порядок випробування на стиск. Встановлено, що випробування виконували на 28-му добу після заливання суміші у форми, що відповідає нормативному віку бетону для оцінювання його міцності.

Запропонована структура розділу дає змогу послідовно охарактеризувати програму досліджень, технологію виготовлення зразків, методику випробування та обробку результатів, що підвищує логічність і наукову завершеність викладення матеріалу.

## РОЗДІЛ 3

### РЕЗУЛЬТАТИ ТА АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ

У цьому розділі наведено результати експериментального визначення міцності бетонних зразків-кубів розміром  $100 \times 100 \times 100$  мм для контрольного складу та складів із 5, 10 і 15 % вапнякового відсіву цукрового виробництва, введеного як часткова заміна цементу за масою. Окрім безпосереднього подання результатів випробувань, виконано їх нормативну обробку згідно з ДСТУ Б В.2.7-214:2009, статистичний аналіз, порівняння з контрольним складом, побудовано графічні залежності та проведено зіставлення з близькими за тематикою українськими та міжнародними дослідженнями.

#### 3.1 Характеристика експериментальних досліджень

Програмою дослідження було передбачено чотири серії зразків: контрольну серію D (0 % добавки), а також три дослідні серії з 5, 10 та 15 % вапнякового відсіву. У кожній серії було випробувано по три зразки, тобто загальна кількість випробуваних кубів становила 12 шт. Випробування проводили на 28-му добу твердіння, що відповідає нормативному віку бетону для оцінювання міцності за контрольними зразками.

Перед випробуванням для кожного куба було зафіксовано масу, фактичні розміри опорної грані, максимальне руйнівне навантаження та обчислено міцність на стиск.

Узагальнені результати випробувань подано в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Первинні результати випробувань бетонних кубів

Позначення зразка	Серія	Маса, кг	Довжина, мм	Ширина, мм	Макс. навантаження, кН	Міцність, МПа	Примітка
KUBYK100(1)	15%	2,29	100	100	198,70	18,87	прийнято
KUBYK100(2)	15%	2,33	101	102	106,60	9,83	дефектне руйнування
KUBYK100(3)	15%	2,33	101	100	180,50	16,90	прийнято
KUBYK100(D1)	0%	2,35	100	100	187,90	17,70	прийнято
KUBYK100(D2)	0%	2,31	100	100	190,70	18,10	прийнято
KUBYK100(D3)	0%	2,38	100	101	209,00	18,80	прийнято
KUBYK100-5(1)	5%	2,30	102	99	191,60	18,00	прийнято
KUBYK100-5(2)	5%	2,32	101	102	221,40	20,40	прийнято
KUBYK100-5(3)	5%	2,35	101	101	201,90	18,80	прийнято
KUB100-10(1)	10%	2,35	100	100	183,00	17,00	прийнято
KUB100-10(2)	10%	2,36	100	103	195,50	18,00	прийнято
KUB100-10(3)	10%	2,36	102	101	195,20	18,00	прийнято

Із таблиці видно, що фактичні розміри зразків лише незначно відхилялися від номінальних 100×100 мм. Довжина опорної грані змінювалась у межах 100–102 мм, а ширина – у межах 99–103 мм. Маса кубів перебувала в інтервалі 2,293–2,381 кг, що є типовим для важкого бетону з щільним крупним і дрібним заповнювачем. Найбільше руйнівне навантаження зафіксовано для зразка KUBYK100-5(2) (221,4 кН), а найменше – для KUBYK100(2) (106,6 кН), що корелює з його аномально низькою міцністю 9,83 МПа.

Для додаткової інтерпретації було оцінено середню густину зразків за фактичними розмірами. Це дало можливість перевірити, чи не пов'язане падіння

міцності окремих зразків лише зі зміною об'ємної маси матеріалу. Узагальнені геометричні та масові характеристики подано в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Узагальнені геометричні та масові характеристики зразків за серіями

Серія	Середня довжина, мм	Середня ширина, мм	Середня маса, кг	Середня площа опорної грані, мм <sup>2</sup>	Середня густина, кг/м <sup>3</sup>
0%	100,00	100,33	2,35	10033,33	2337,48
5%	101,33	100,67	2,32	10200,33	2277,13
10%	100,67	101,33	2,36	10200,67	2309,71
15%	100,67	100,67	2,32	10134,00	2289,82

Як видно з табл. 3.2, відмінності у середній густині серій не є суттєвими: усі вони лежать приблизно в межах 2277–2337 кг/м<sup>3</sup>. Це означає, що різниця в міцності між серіями пояснюється передусім не зміною щільності бетону як такої, а впливом вапнякового відсіву на структуру цементного каменю та контактну зону між пастою і зернами заповнювача.

### 3.2 Нормативна обробка результатів за ДСТУ Б В.2.7-214:2009

Міцність бетону в серії зразків оцінювали відповідно до вимог ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Стандарт встановлює, що для серії з трьох зразків міцність визначають як середнє арифметичне двох зразків з найбільшою міцністю. Якщо дефектний зразок відбраковується, то міцність серії визначають за всіма зразками, що залишилися, за умови, що їх не менше двох.

У нашому випадку це правило застосовується до всіх чотирьох серій, але серія 15 % має особливість: зразок КУВУК100(2) продемонстрував дефектне руйнування. Оскільки цей результат не характеризує реальну міцність матеріалу,

його не було враховано при визначенні міцності серії. Таким чином, серію 15 % було обчислено за двома зразками, що залишилися – KUBYK100(1) та KUBYK100(3).

Для повноти аналізу далі наведено як арифметичне середнє всіх трьох вимірних значень у серії, так і значення міцності серії за ДСТУ. Такий подвійний підхід дозволяє показати, як нормативна процедура впливає на кінцеву інтерпретацію результатів.

Таблиця 3.3 – Нормативна обробка результатів випробувань

Серія	Міцність окремих зразків, МПа	Середнє всіх трьох	Середнє валідних	Міцність серії за ДСТУ	Відбраковування дефектного зразка
0%	17,70; 18,10; 18,80	18,20	18,20	18,45	ні
5%	18,00; 20,40; 18,80	19,07	19,07	19,60	ні
10%	17,00; 18,00; 18,00	17,67	17,67	18,00	ні
15%	18,87; 9,83; 16,90	15,20	17,88	17,88	так

З табл. 3.3 видно, що для контрольної серії без добавки міцність серії за ДСТУ становить 18,45 МПа; для серії з 5 % відсіву – 19,60 МПа; для серії з 10 % – 18,00 МПа; для серії з 15 % – 17,89 МПа. Отже, нормативно підтверджене максимальне значення міцності отримано саме при вмісті 5 % вапнякового відсіву.

Особливо показовим є порівняння арифметичного середнього всіх трьох зразків і нормативного значення серії. Наприклад, для серії 5 % арифметичне середнє всіх трьох зразків становить 19,07 МПа, але міцність серії за ДСТУ зростає до 19,60 МПа, оскільки враховуються два найбільші значення. Такий самий принцип спрацьовує і для контрольної та 10 %-ї серії. Для 15 %-ї серії арифметичне середнє всіх трьох зразків різко знижується до 15,20 МПа лише через один дефектний результат, тоді як нормативне значення 17,89 МПа краще відображає міцність матеріалу за валідними зразками. Міцність досліджених зразків подано на Рис. 3.1.

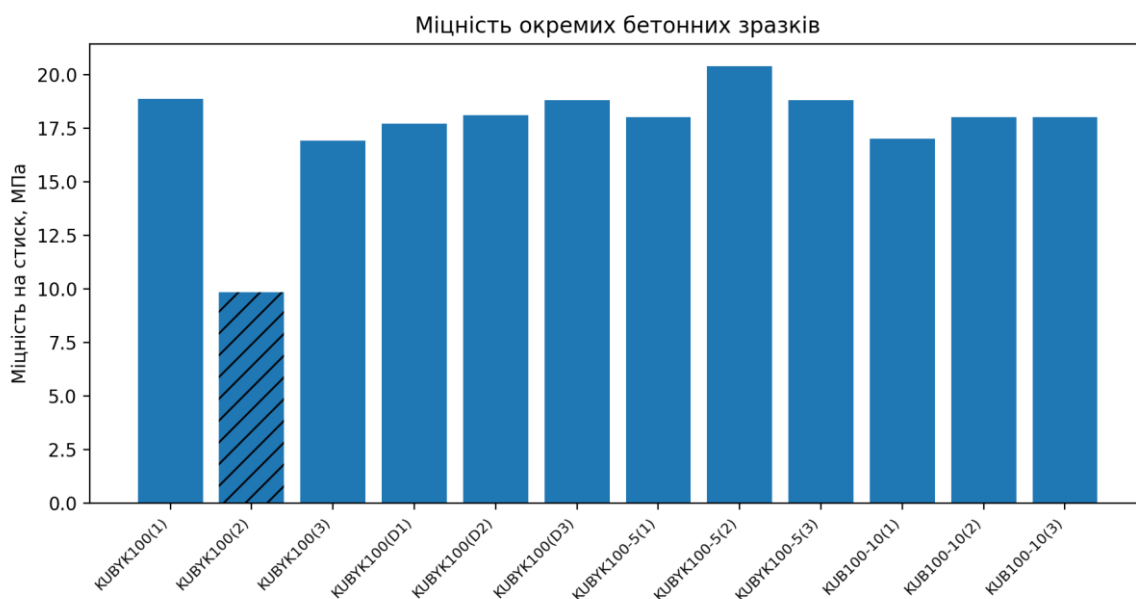


Рисунок 3.1 – Міцність бетонних зразків

Максимальне руйнівне навантаження випробуваних зразків представлено на Рис. 3.2.

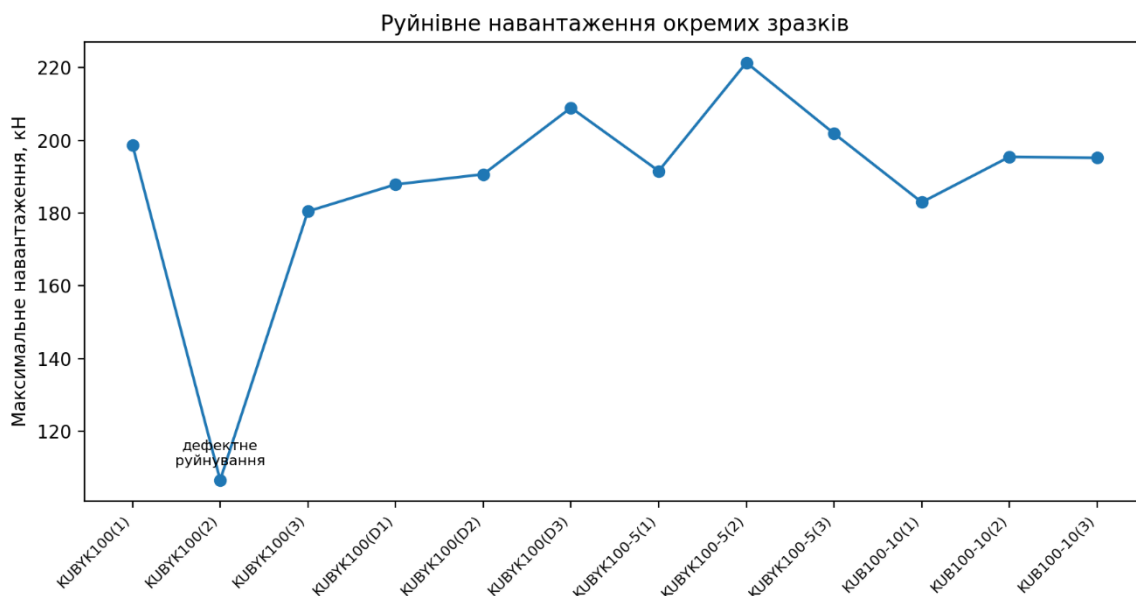


Рисунок 3.2 – Максимальне руйнівне навантаження окремих зразків

Відокремлений характер результату KUBYK100(2) можна побачити на Рис. 3.1 та 3.2. За міцністю і за руйнівним навантаженням цей зразок істотно

випадає з масиву експериментальних даних. Відповідно, його виключення з подальшого осереднення є нормативно і методично обґрунтованим рішенням.

### 3.3 Статистичний аналіз і порівняння серій

В табл. 3.4. подано статистичні показники результатів експериментальних досліджень.

Таблиця 3.4 – Статистичні показники результатів випробувань

Серія	Кількість зразків	Залікові зразки	Середнє всіх трьох, МПа	Стандартне відхилення, МПа	Коеф. варіації, %	Міцність серії за ДСТУ, МПа	Δ до контролю, МПа	Δ до контролю, %
0%	3	3	18,20	0,56	3,06	18,45	0,00	0,00
5%		3	19,07	1,22	6,41	19,60	1,15	6,23
10%		3	17,67	0,58	3,27	18,00	-0,45	-2,44
15%		2	15,20	4,75	31,27	17,88	-0,57	-3,06

Табл. 3.4 показує, що контрольна серія має нормативну міцність 18,45 МПа, тоді як серія з 5 % вапнякового відсіву демонструє приріст на 1,15 МПа, або на 6,23 % відносно контролю. Серія з 10 % відсіву характеризується зниженням на 0,45 МПа (-2,44 %), а серія з 15 % – на 0,57 МПа (-3,06 %).

Варто звернути увагу і на мінливість результатів. Для контрольної серії коефіцієнт варіації становить 3,17 %, для серії з 5 % – 6,79 %, а для серії з 10 % – 3,27 %. Це свідчить про добру повторюваність вимірювань. Для серії 15 %, якщо враховувати всі три зразки, коефіцієнт варіації різко зростає до 28,22 %, що повністю підтверджує аномальний характер одного результату. Саме тому без відбраковування дефектного зразка інтерпретація цієї серії була б викривленою.

У ДСТУ Б В.2.7-214:2009 також зазначено, що при середньому внутрішньосерійному коефіцієнті варіації міцності бетону на стиск понад 8 %

необхідно проводити позачергову переатестацію лабораторії, але ця вимога стосується усереднення за великою кількістю послідовних серій. У межах даної роботи значення коефіцієнта варіації використовувались насамперед як аналітичний показник однорідності серії.

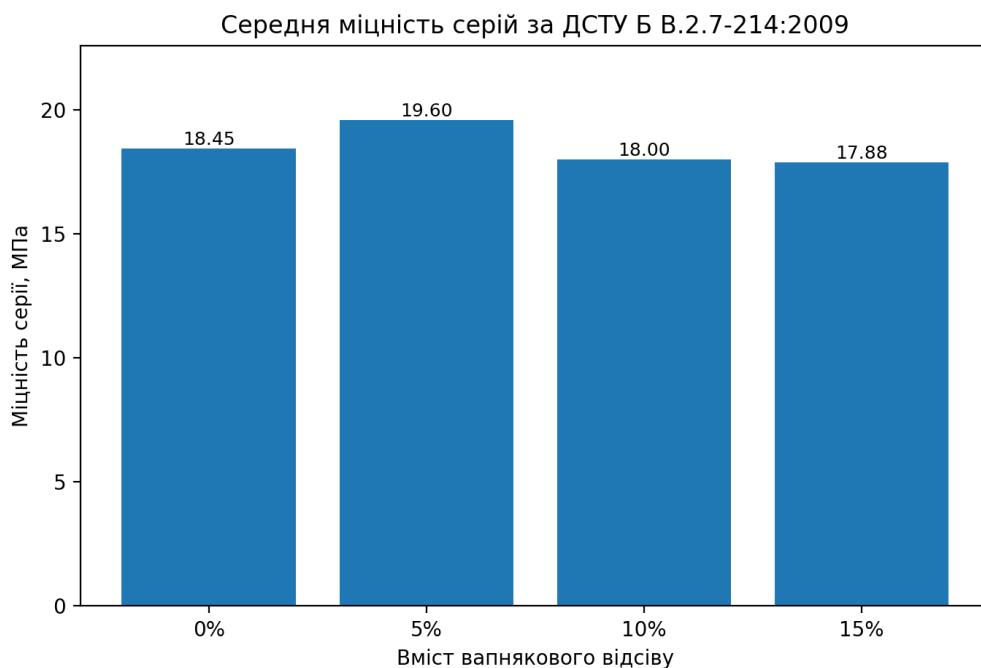


Рисунок 3.3 – Міцність серій за ДСТУ Б В.2.7-214:2009

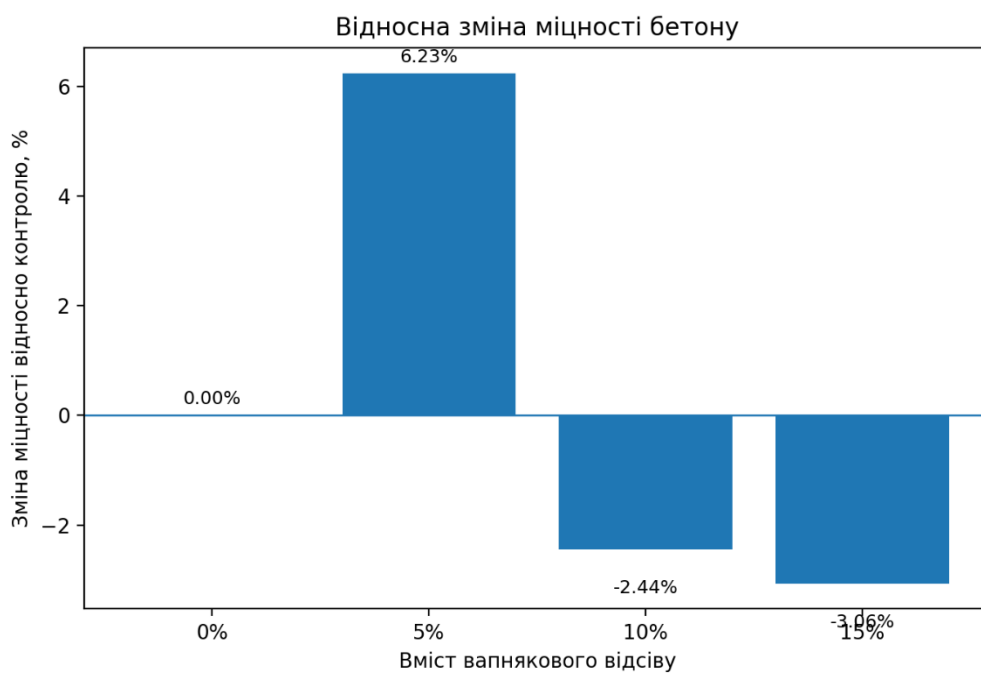


Рисунок 3.4 – Відносна зміна міцності серій порівняно з контролем

На рис. 3.3 добре видно, що залежність добавки від міцності є нелінійною. Невелика кількість вапнякового відсіву забезпечує приріст міцності, тоді як подальше збільшення дозування до 10 і 15 % призводить до її зниження. На рис. 3.4 цей самий результат подано у відносних величинах: серія 5 % перевищує контроль, а серії 10 і 15 % уже мають негативний баланс.

Отримані результати збігаються із типовими для малореакційних або низькорекційних карбонатних порошків закономірностями. За малих дозувань домінує ефект ущільнення зернового складу, заповнення пустот і формування додаткових центрів кристалізації продуктів гідратації. За більших дозувань починає переважати ефект розбавлення цементу, тобто зменшення кількості активного в'язучого в системі.

### **3.4 Порівняльний аналіз одержаних результатів**

Для глибокої інтерпретації одержаних результатів їх порівнювали з роботами, присвяченими карбонатним промисловим відходам та вапняковим порошкам у бетоні й цементних композиціях. Оскільки прямих публікацій саме про вапняковий відсів цукрового виробництва небагато, порівняння проводили з трьома групами джерел: 1) дослідженнями відходів бурякоцукрового виробництва; 2) оглядовими науковими працями, присвяченими застосуванню вапнякового шламу в бетоні; 3) фундаментальними дослідженнями вапнякового порошку як мінеральної добавки до цементних і бетонних систем.

Проаналізовані схожі наукові результати дослідженнями та співставлені з одержаними даними в даній роботі подано в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Порівняння власних результатів із близькими науковими дослідженнями

Джерело	Тип добавки/відходу	Діапазон заміни	Оптимум	Ключовий висновок
Поточне дослідження	Вапняковий відсів цукрового виробництва	0; 5; 10; 15 % заміни цементу	5 %	Приріст міцності на 6,23 %; при 10–15 % – зниження
Gharieb et al. (2020)	Carbonation lime residue (відхід бурякоцукрового виробництва)	5–25 % заміни цементу	5 %	Міцність і мікроструктура поліпшувались при 5 %; при більших дозах міцність зменшувалась
Vashistha et al. (2019)	Вапняковий шлам	Багато схем заміни цементу й піску	Часто 10–30 %	Зведені дані огляду показують, що в багатьох роботах зберігається прийнятна міцність у межах 10–30 %, але оптимум залежить від походження і підготовки шламу
Zhang et al. (2016)	Високооб’ємний вапняковий порошок	Високі рівні заміни	Низькі/помірні дози ефективніші	За високих доз зростала пористість і знижувалась міцність; зменшення w/b або введення GGBS частково компенсувало ефект
Zeng et al. (2024)	відходи кам'яного/вапнякового порошку	Різні схеми	Невеликі дози	Покращення пояснюється micro-filling та micro-crystalline effect, тобто ущільненням структури та прискоренням гідратації

Найближчим за суттю із проведеними дослідженнями та одержаними результатами є дослідження Gharieb та співавт. (2020), присвячене використанню carbonation lime residue – карбонатного відходу бурякоцукрового виробництва – як цементуючого матеріалу. Автори встановили, що оптимальним є саме 5 %-ве

заміщення цементу, а більші кількості добавки призводять до зниження міцності та зростання пористості. Цей висновок майже повністю збігається з результатами поточного дослідження, де найкращий результат також отримано при 5 % заміни цементу.

Оглядова робота Vashistha та співавт. (2019), присвячена вапняковому шламу будівельних матеріалах, узагальнює значно ширший масив джерел і показує, що в деяких системах допустимим або навіть раціональним може бути заміщення цементу на рівні 10–30 %. Така розбіжність пояснюється тим, що огляд охоплює різні види вапнякового шламу з різним хімічним складом, дисперсністю, вмістом домішок і способами активації, а також різні матриці – бетон, розчин, кераміку. Тому пряме порівняння чисел без урахування походження матеріалу було б некоректним.

Робота Zhang et al. (2016) показує інший важливий аспект: за високих рівнів заміни цементу вапняковим порошком підвищується взаємозв'язана пористість і знижується міцність. У нашому випадку домішки у 10 і 15 % ще не є високооб'ємними у класичному розумінні, але тенденція виявилась тією самою – після переходу через оптимальне значення починає домінувати ефект розбавлення в'язучої системи.

Дані, наведені Zeng et al. (2024), добре пояснюють причину позитивного ефекту малих дозувань: тонкодисперсний вапняковий порошок може працювати як мікронаповнювач і центр кристалізації гідратів, тим самим ущільнюючи структуру і покращуючи міцність. Саме такий механізм найімовірніше реалізувався в серії 5 %, де зафіксовано приріст міцності відносно контрольного зразка.

### **3.5 Механізм впливу добавок**

Аналіз одержаних експериментальних даних та їх зіставлення з літературою дозволяє запропонувати таке пояснення впливу вапнякового відсіву цукрового виробництва на міцність бетону.

По-перше, при дозуванні 5 % відсів виконує роль тонкодисперсного мінерального наповнювача. Його дрібні частинки можуть заповнювати проміжки між зернами цементу та дрібного заповнювача, покращувати пакування твердих частинок у системі та зменшувати об'єм капілярних пор. Це сприяє ущільненню мікроструктури і певному зростанню міцності.

По-друге, карбонатна складова може діяти як додатковий центр кристалізації продуктів гідратації. У такому випадку на поверхні частинок відсіву швидше формується цементний камінь, а контактна зона між пастою і заповнювачем стає більш однорідною. Саме з цим, найімовірніше, пов'язаний приріст міцності в серії 5 %.

По-третє, при підвищенні дозування до 10–15 % починає відчутно проявлятися ефект розбавлення: частина активного цементу замінюється карбонатним матеріалом, який не забезпечує еквівалентного утворення гідратаційних продуктів. Якщо вапняковий відсів не зазнавав додаткової активації (тонкого помелу до надтонкої фракції, хімічного оброблення чи термообробки), то на вищих дозах він працює радше як інертний або слабкоактивний наповнювач, ніж як повноцінна цементуюча складова.

Додатковим фактором може бути і вплив добавки на водопотребу суміші. Тонкодисперсні порошки часто змінюють рухливість бетонної суміші та підвищують потребу в воді при збереженні тієї самої зручності укладання. Якщо це не компенсувати пластифікатором або коригуванням рецептури, структура затверділого бетону може стати менш щільною.

Нарешті, не можна виключати вплив неоднорідності самого відходу. Вапняковий відсів цукрового виробництва, на відміну від стандартизованого вапняковий порошку промислового помелу, може містити домішки, різнофракційні частинки, змінну вологість і залишкові технологічні компоненти. Усе це підвищує варіативність поведінки матеріалу в бетонній суміші.

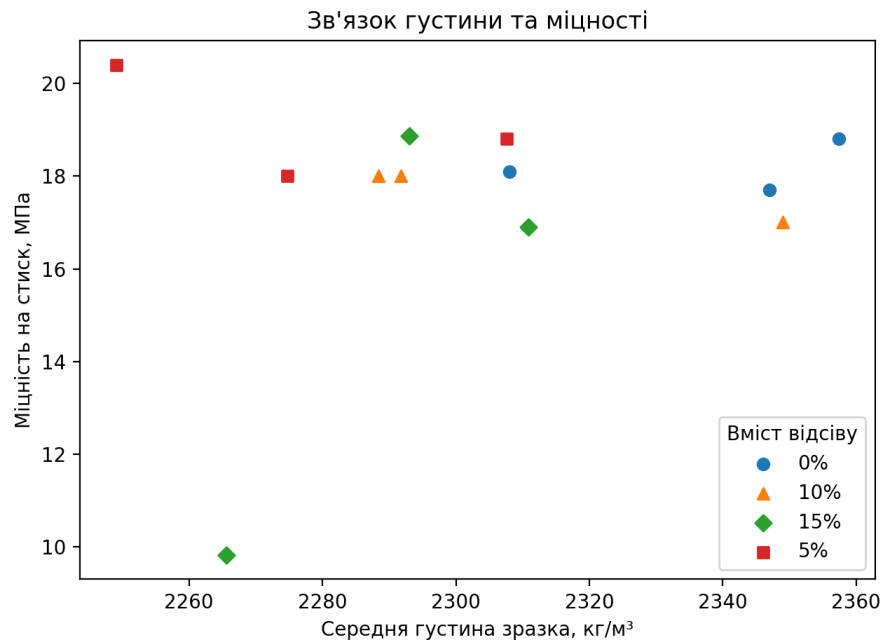


Рисунок 3.5 – Зв'язок між середньою густиною та міцністю окремих зразків

Із рис. 3.5 слідує, що прямої залежності між густиною окремого зразка і його міцністю не спостерігається. Це ще раз підтверджує, що механізм впливу відсіву пов'язаний не лише з загальною щільністю матеріалу, а насамперед зі зміною мікроструктури цементного каменю та контактної зони.

### 3.6 Перспективи подальших досліджень

Проведені дослідження підтвердили перспективність використання вапнякового відсіву цукрового виробництва як мінеральної добавки до бетону, однак для повнішого обґрунтування його застосування доцільно розширити програму випробувань. Насамперед варто уточнити оптимальний вміст добавки в межах 0–10 % заміни цементу, дослідити вплив дисперсності відсіву та оцінити зміну міцності не лише на 28-му, а й на ранніх і пізніших строках твердіння. Важливим напрямом подальших робіт є також визначення супутніх властивостей бетону, зокрема водопоглинання, щільності, пористості та морозостійкості, а також проведення мікроструктурних досліджень для уточнення механізму дії добавки. Окремий інтерес становить вивчення комбінованого використання вапнякового

відсіву з іншими активними мінеральними добавками, що може підвищити ефективність його практичного застосування у бетонних сумішах.

### 3.7 Висновки до розділу 3

За результатами випробувань 12 зразків-кубів встановлено, що нормативна міцність серій за ДСТУ Б В.2.7-214:2009 становить: для контрольної серії – 18,45 МПа; для серії з 5 % вапнякового відсіву – 19,60 МПа; для серії з 10 % – 18,00 МПа; для серії з 15 % – 17,89 МПа.

Зразок КУВУК100(2) серії 15 % мав дефектне руйнування і результат 9,83 МПа, тому відповідно до вимог стандарту цей показник не враховувався при визначенні міцності серії.

Найефективнішим в межах одержаних експериментальних результатів виявилось дозування 5 % від маси цементу, яке забезпечило приріст міцності на 1,15 МПа, або на 6,23 % відносно контрольного складу.

Збільшення вмісту вапнякового відсіву до 10 і 15 % не дало позитивного ефекту: міцність зменшилася відповідно на 2,44 і 3,06 % порівняно з контролем.

Отримані результати узгоджуються з близькими міжнародними дослідженнями цукрових карбонатних відходів і вапнякового порошку, у яких невеликі дозування добавки покращують мікроструктуру і міцність, а вищі рівні заміни цементу викликають ефект розбавлення та підвищення пористості.

Подальші дослідження доцільно зосередити на уточненні оптимального дозування, зміні дисперсності відсіву, вивченні властивостей у різному віці твердіння, а також на мікроструктурному та довговічному аналізі.

## РОЗДІЛ 4

### ОБҐРУНТУВАННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОНАНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 4.1 Загальні положення щодо оцінювання загальної ефективності

Економічну ефективність використання вапнякового відсіву цукрового виробництва у складі бетону доцільно оцінювати не лише за прямою економією цементу, а й за комплексом техніко-економічних показників. До таких показників належать матеріаломісткість бетонної суміші, трудомісткість підготовки та виготовлення зразків, технологічність застосування мінеральної добавки, а також можливий вплив на експлуатаційний ресурс конструкцій. Саме такий підхід дає змогу обґрунтувати доцільність використання локального техногенного матеріалу не лише в лабораторних умовах, а й у практиці виробництва бетонів.

За результатами експериментальних досліджень встановлено, що при заміні 5 % цементу вапняковим відсівом міцність бетону збільшується з 18,45 до 19,60 МПа. За вмісту 10 % відсіву міцність становить 18,00 МПа, а при 15 % — 17,89 МПа. Отже, саме склад із 5 % вапнякового відсіву забезпечив найкраще поєднання технічного результату та потенційної економічної доцільності. Подальше збільшення частки добавки хоча і знижує витрату цементу, однак уже не супроводжується підвищенням міцності, що обмежує практичну ефективність таких складів.

#### 4.2 Зниження матеріаломісткості бетонної суміші

Найбільш вартісним компонентом важкого бетону є цемент, тому саме його часткова заміна мінеральною добавкою є основним резервом зниження матеріаломісткості. Якщо прийняти умовну витрату цементу в контрольному складі на рівні 400 кг/м<sup>3</sup>, то в дослідних складах вона становитиме 380 кг/м<sup>3</sup> при введенні 5 % відсіву, 360 кг/м<sup>3</sup> при 10 % та 340 кг/м<sup>3</sup> при 15 %. Таким чином, потенційна економія цементу на 1 м<sup>3</sup> бетону становить відповідно 20, 40 і 60 кг.

Однак формальне зменшення витрати цементу саме по собі ще не означає економічної ефективності. Економічно доцільною є така заміна, за якої зменшення витрат в'язучого не супроводжується погіршенням основних експлуатаційних характеристик бетону. У проведених дослідженнях лише склад із 5 % вапнякового відсіву поєднав дві позитивні ознаки: зниження витрати цементу та одночасне зростання міцності. Для складів із 10 % і 15 % відсіву економія цементу вже супроводжувалася зменшенням міцності, а отже, у виробничих умовах така заміна може потребувати збільшення витрати в'язучого або зміни рецептури для забезпечення нормативних показників.

Порівняльну оцінку дослідженого бетону з різним відсотковим складом вапнякового відсіву цукрового виробництва подано в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Порівняльна оцінка досліджених складів бетону

Склад	Міцність, МПа	Зміна до контролю, %	Витрата цементу, кг/м <sup>3</sup>	Оцінка
Контрольний (0 %)	18,45	0,00	400	базовий
З 5 % відсіву	19,60	+6,23	380	найкращий
З 10 % відсіву	18,00	-2,44	360	умовно доцільний
З 15 % відсіву	17,89	-3,04	340	обмежено доцільний

Для більш наочного порівняння доцільно оцінювати не лише абсолютну витрату цементу, а й питомі витрати цементу на 1 МПа міцності бетону. Для контрольного складу цей показник становить близько 21,68 кг/(м<sup>3</sup>·МПа), для складу з 5 % відсіву — 19,39 кг/(м<sup>3</sup>·МПа), для складу з 10 % — 20,00 кг/(м<sup>3</sup>·МПа), а для складу з 15 % — 19,01 кг/(м<sup>3</sup>·МПа). Хоча формально найнижче значення має склад із 15 % добавки, його абсолютна міцність є нижчою за контрольну. Тому з практичної точки зору найбільш раціональним слід вважати склад із 5 % відсіву,

який забезпечує зниження питомих витрат цементу приблизно на 10,6 % без втрати міцності.

### **4.3 Вплив на трудомісткість та технологічність**

Використання вапнякового відсіву цукрового виробництва дещо ускладнює підготовчий етап, оскільки потребує контролю вологості, сушіння за необхідності, просіювання та точного дозування добавки. Саме ці операції збільшують трудомісткість у порівнянні з контрольним складом. Проте дане збільшення є незначним і не потребує принципово нового обладнання чи повної зміни технологічної схеми.

Технологічно важливо, що введення відсіву у кількості 5 % не змінює базового процесу приготування бетонної суміші. Усі основні операції — дозування матеріалів, змішування, укладання у металеву опалубку, ущільнення та твердіння — виконуються за традиційною технологією. Це означає, що впровадження такої добавки у виробничих умовах не призведе до істотного зростання тривалості циклу виготовлення бетонних виробів.

З точки зору технологічності найдоцільнішим є саме низький рівень заміщення цементу. У цьому випадку вапняковий відсів виконує функцію тонкодисперсного мікронаповнювача, сприяє ущільненню структури суміші та не потребує кардинального перегляду рецептури. При підвищенні дозування до 10–15 % ризик зростання водопотреби та втрати міцності стає вищим, а отже технологічна доцільність таких складів зменшується.

### **4.4 Потенційний вплив на експлуатаційний ресурс конструкцій**

Безпосереднє оцінювання довговічності бетону, зокрема морозостійкості, водонепроникності, стираності або стійкості до корозійних впливів, у межах даної роботи не виконувалося. Тому твердження про реальне підвищення ресурсу

експлуатації конструкцій можуть мати лише прогнозний характер. Разом із тим сам факт зростання міцності при введенні 5 % вапнякового відсіву дає підстави припускати позитивний вплив на щільність цементного каменю та контактну зону між цементною матрицею і заповнювачем.

Щільніша структура бетону, як правило, пов'язана з меншою капілярною пористістю, кращою тріщиностійкістю на ранніх стадіях твердіння та більш стабільною роботою матеріалу в умовах змінної вологості. Це дозволяє розглядати склад із 5 % вапнякового відсіву як перспективний з точки зору подальших досліджень довговічності. Отже, потенційний економічний ефект у майбутньому може полягати не лише у зниженні витрат цементу, а й у зменшенні витрат на ремонт і відновлення конструкцій протягом їх експлуатації.

Для складів із 10 % і 15 % відсіву такий позитивний прогноз є менш обґрунтованим, оскільки зниження міцності свідчить про можливе послаблення цементної системи. У виробничій практиці це може призвести до обмеження сфери застосування бетону або до необхідності додаткового коригування рецептури, що знижує загальний економічний ефект.

#### **4.5 Узагальнення економічної ефективності**

Проведене техніко-економічне обґрунтування показало, що найбільш раціональним є використання вапнякового відсіву цукрового виробництва в кількості 5 % від маси цементу. Саме за такого дозування забезпечується поєднання зменшення матеріаломісткості бетонної суміші, зниження питомих витрат цементу на одиницю міцності та підвищення самої міцності бетону.

Склади з більшим вмістом відсіву не можна вважати однозначно неефективними, однак їх практичне використання потребує додаткового експериментального уточнення. Зокрема, доцільно дослідити їх робочість, водопотребу, густину, водопоглинання та довговічність. Для даної кваліфікаційної роботи основний висновок полягає в тому, що введення 5 % вапнякового відсіву

цукрового виробництва є економічно обґрунтованим, технологічно здійсненним і перспективним напрямом ресурсозбереження у виробництві бетонів.

Таким чином, запропонований підхід дозволяє одночасно вирішувати дві практичні задачі: частково утилізувати місцевий промисловий відхід і підвищувати ефективність використання цементу як основного в'язучого компонента бетонної суміші. Це підтверджує доцільність подальших досліджень і розширення програми випробувань у напрямі оцінювання довговічності та виробничого впровадження.

#### **4.6 Висновки до розділу 4**

Часткова заміна цементу вапняковим відсівом цукрового виробництва дає можливість знизити матеріаломісткість бетонної суміші за рахунок зменшення витрати в'язучого компонента.

Найбільш технічно та економічно доцільним виявився склад із 5 % відсіву, який забезпечив підвищення міцності бетону до 19,60 МПа при одночасному зменшенні витрати цементу.

Використання вапнякового відсіву в невеликій кількості не потребує суттєвого ускладнення технології виготовлення бетонних зразків і не призводить до істотного зростання трудомісткості робіт.

Підвищення міцності бетону при введенні 5 % відсіву дозволяє прогнозувати позитивний вплив на експлуатаційну надійність і потенційний ресурс конструкцій, що потребує подальшого підтвердження спеціальними дослідженнями довговічності.

Отже, використання 5 % вапнякового відсіву цукрового виробництва є економічно обґрунтованим напрямом підвищення ефективності бетонних технологій.

## РОЗДІЛ 5

### ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

#### 5.1 Охорона праці

##### 5.1.1 Загальні положення з охорони праці під час виконання експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження впливу вапнякового відсіву цукрового виробництва на міцність бетону пов'язані з підготовкою сипких матеріалів, визначенням вологості добавки, приготуванням бетонної суміші, формуванням контрольних зразків у металевій опалубці, витримуванням кубів і подальшим випробуванням їх на стиск на серво-гідравлічному пресі Matest C104N із блоком керування Servo-Plus Evolution. Кожен із перелічених етапів супроводжується дією небезпечних і шкідливих виробничих чинників, тому всі роботи повинні виконуватися з дотриманням вимог охорони праці, виробничої санітарії, електробезпеки, пожежної безпеки та безпеки в надзвичайних ситуаціях [25].

Основними небезпеками під час виконання досліджень є цементний та мінеральний пил у повітрі робочої зони, контакт шкіри й очей із цементом і бетонною сумішшю, травмування при роботі з металевою опалубкою та зразками, ризик ураження електричним струмом під час користування лабораторним обладнанням, а також небезпека руйнування контрольних кубів під дією стискуючого навантаження на пресі.

До виконання лабораторних досліджень допускаються особи, які пройшли інструктаж з охорони праці, ознайомлені з правилами експлуатації обладнання, знають порядок дій у разі аварійної ситуації та забезпечені засобами індивідуального захисту [25]. Обов'язковими засобами індивідуального захисту є лабораторний халат або робочий одяг, захисні окуляри, рукавички, респіратор або пилозахисна маска, а також закрите взуття з неслизькою підошвою.

## **5.2 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих чинників**

### **5.2.1 Підготовка сировини та дозування компонентів**

На стадії дозування цементу, піску, щебеню та вапнякового відсіву основним шкідливим чинником є пил. Найбільш небезпечними є дрібнодисперсні частинки цементу та мінеральної добавки, які можуть потрапляти в органи дихання, подразнювати слизові оболонки та очі. Додаткову небезпеку становлять ручне переміщення тари з компонентами, можливість порізів об гострі краї інструментів і тари, а також засмічення робочого місця сипкими матеріалами.

### **5.2.2 Приготування бетонної суміші**

При взаємодії цементу з водою утворюється лужне середовище, здатне викликати подразнення шкіри і слизових оболонок. Під час перемішування бетонної суміші можливі потрапляння бризок розчину в очі, контакт суміші зі шкірою рук, переважно при переміщенні важких ємностей, а також утворення слизьких ділянок підлоги через розливу воду чи залишки розчину. Особливо небезпечним є тривалий контакт шкіри з вологим цементним розчином, оскільки він може призвести до лужних опіків.

### **5.2.3 Формування зразків у металевій опалубці**

У дослідженні бетонні зразки формували у металевій опалубці на три куби розміром 100×100×100 мм. Використання металевої опалубки забезпечує точність геометричних розмірів, однак створює ризик защемлення пальців під час складання або розбирання форми, порізів об кромки металевих елементів, травмування при ущільненні суміші та падіння форми або зразка на руки чи ноги. Металеву опалубку слід установлювати на рівну й стійку поверхню, а заповнення її бетонною сумішшю виконувати без різких ударів та перекосів.

## **5.2.4 Визначення вологості вапнякового відсіву**

Вологість вапнякового відсіву визначали вологоміром Mastech MS6900. Хоча сама операція є відносно безпечною, під час відбору та підготовки матеріалу зберігається небезпека вдихання пилу сухого відсіву. Прилад слід використовувати сухими руками, вимірювання виконувати на стабільно розміщеному матеріалі, а після завершення роботи очищати прилад від пилу.

## **5.2.5 Випробування зразків на стиск**

Найнебезпечнішим етапом досліджень є випробування бетонних кубів на стиск на пресі Matest C104N з блоком Servo-Plus Evolution. Під час випробування можливі затискання рук між опорними плитами, відліт уламків у момент руйнування зразка, раптовий розкол куба, а також ураження електричним струмом у разі несправності електронного або гідравлічного обладнання. Безпечність роботи забезпечується суворим дотриманням інструкції з експлуатації преса, правильною установкою зразка і перебуванням оператора поза небезпечною зоною в момент навантаження.

## **5.3 Вимоги безпеки перед початком роботи**

Перед початком лабораторних робіт необхідно перевірити загальний стан робочого місця, прибрати сторонні предмети з проходів і робочих поверхонь, підготувати форми, інструмент, ємності для сумішей, засоби очищення й засоби індивідуального захисту. Потрібно переконатися у справності електрообладнання, відсутності пошкоджених кабелів, оголених проводів, витоків та поломок корпусу приладів.

Перед запуском преса слід оглянути стан опорних плит, перевірити правильність встановлення зразка, упевнитися у відсутності сторонніх предметів у

зоні рухомих елементів і в тому, що сторонні особи знаходяться на безпечній відстані. Експлуатація обладнання з ознаками несправності або без належних засобів індивідуального захисту не допускається.

#### **5.4 Вимоги безпеки під час виконання досліджень**

Під час дозування сухих компонентів і приготування бетонної суміші забороняється працювати без респіратора, рукавичок та окулярів, а також допускати інтенсивне пиловиділення, розсипання цементу чи відсіву на значній площі. Ємності з бетонною сумішшю слід переносити обережно, без ривків.

Під час роботи з металевою опалубкою необхідно уникати утримування пальців у місцях можливого защемлення, не використовувати пошкоджені форми та очищати їх лише після повного звільнення від суміші. Під час ущільнення суміші не допускаються надмірні удари, що можуть спричинити зміщення форми.

Під час випробування зразків на стиск не допускається торкатися зразка або рухомих елементів преса після початку навантаження, нахилитися над кубом у момент руйнування чи знімати уламки до повної зупинки машини. У разі появи сторонніх шумів, нестабільної роботи цифрового блока, ривків траверси або ознак витoku рідини роботу необхідно негайно припинити та повідомити відповідальну особу.

#### **5.5 Виробнича санітарія та захист від цементного пилу**

Цементний пил та пил вапнякового відсіву є одними з основних шкідливих чинників у лабораторії. Вони подразнюють дихальні шляхи, очі та шкіру, а при тривалому впливі можуть спричинити хронічні захворювання органів дихання. Для зниження запиленості робочої зони дозування сухих компонентів необхідно проводити обережно, без різкого пересипання, а робоче приміщення повинно бути забезпечене ефективним провітрюванням [25, 26].

З метою виробничої санітарії необхідно регулярно виконувати вологе прибирання приміщення, не змітати пил сухим способом, зберігати сухі компоненти в закритій тарі, а після завершення роботи ретельно мити руки та відкриті ділянки шкіри. Запилений робочий одяг не слід виносити у побутові приміщення без попереднього очищення.

## **5.6 Електробезпека, пожежна безпека та захист від шуму**

Електричну небезпеку в лабораторії створюють прес, цифровий блок керування, прилади вимірювання та освітлювальне обладнання. Для забезпечення електробезпеки необхідно використовувати лише справне обладнання із заземленням, не торкатися електроприладів вологими руками, не допускати потрапляння води на електричні частини та відключати обладнання від мережі після закінчення роботи.

Пожежна безпека в лабораторії пов'язана переважно з ризиком короткого замикання, перевантаженням електромережі та зберіганням горючих допоміжних матеріалів [27]. У приміщенні повинні бути наявні первинні засоби пожежогашіння, вільний доступ до вимикачів та евакуаційних шляхів. Під час роботи преса та руйнування бетонних зразків можливий короткочасний імпульсний шум, тому за потреби допускається використання індивідуальних засобів захисту слуху.

## **5.7 Безпека в надзвичайних ситуаціях**

Під час виконання експериментальних досліджень можливі локальні надзвичайні ситуації: коротке замикання або загоряння електрообладнання, аварійна зупинка преса, руйнування зразка з розльотом уламків, травмування працівника, витік гідравлічної рідини, сильне запилення чи задимлення приміщення. У разі виникнення небезпечної ситуації необхідно негайно припинити

роботу обладнання, відключити живлення, вивести людей із небезпечної зони, повідомити відповідальну особу та, за потреби, викликати екстрені служби [28].

### **5.7.1 Дії при ураженні електричним струмом**

У разі ураження електричним струмом потрібно негайно відключити напругу, не торкатися потерпілого голими руками, якщо він перебуває під дією струму, відтягнути його від джерела небезпеки сухим ізолювальним предметом, перевірити дихання і пульс та, за необхідності, розпочати серцево-легеневу реанімацію до прибуття медичної допомоги.

### **5.7.2 Дії при потраплянні цементу або розчину в очі**

При потраплянні цементної пилу чи бетонної суміші в очі їх слід негайно промити великою кількістю чистої води, не терти та забезпечити звернення до медичного працівника.

### **5.7.3 Дії при травмуванні уламками зразка**

У разі травмування уламками необхідно зупинити кровотечу, обробити рану, накласти стерильну пов'язку та, за серйозного пошкодження, доставити потерпілого до медичного закладу.

### **5.7.4 Дії при пожежі**

У разі пожежі потрібно повідомити про загоряння, відключити електроживлення, використати первинні засоби пожежогасіння, якщо це безпечно, та організовано евакуювати людей із приміщення [29].

## **5.8 Заходи щодо підвищення рівня безпеки під час подальших досліджень**

Для підвищення безпечності подальших експериментальних досліджень доцільно застосовувати локальні витяжні пристрої в зоні дозування цементу й відсіву, використовувати закриті ємності для пересипання сухих компонентів, облаштувати окреме місце для очищення форм і збирання уламків, установити прозорий захисний екран біля робочої зони преса, забезпечити чітке маркування небезпечних зон та проводити цільовий інструктаж перед кожною серією випробувань [30].

## **5.9 Висновки за розділом 5**

Виконання досліджень впливу вапнякового відсіву цукрового виробництва на міцність бетону пов'язане з дією механічних, хімічних, електричних і санітарно-гігієнічних небезпечних чинників. Найбільш небезпечними етапами є приготування бетонної суміші, формування зразків у металевій опалубці та випробування контрольних кубів на стиск на пресі Matest C104N.

Основним шкідливим чинником є цементний та мінеральний пил, тому обов'язковими є засоби індивідуального захисту, вентиляція приміщення та вологе прибирання робочої зони. Безпечне проведення досліджень забезпечується справністю обладнання, дотриманням правил експлуатації преса, правильною організацією робочого місця і готовністю персоналу до дій у надзвичайних ситуаціях.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На підставі аналізу українських і міжнародних джерел встановлено, що використання вапнякового відсіву цукрового виробництва у складі бетону є науково обґрунтованим напрямом, який поєднує матеріалознавчі, екологічні та ресурсозберігаючі переваги. Літературні дані свідчать, що позитивний ефект карбонатних мінеральних добавок зумовлений поєднанням ефектів ущільнення зернового складу, нуклеації продуктів гідратації та часткової хімічної взаємодії карбонатної фази з алюмінатними компонентами цементу.

2. У межах роботи розроблено програму експериментальних досліджень, яка передбачала виготовлення 12 бетонних зразків-кубів розміром  $100 \times 100 \times 100$  мм: контрольної серії без добавки та трьох дослідних серій із частковою заміною цементу вапняковим відсівом цукрового виробництва у кількості 5, 10 і 15 % від маси цементу. Випробування виконували на 28-му добу твердіння, що відповідає нормативному віку бетону для оцінювання його міцності.

3. За результатами випробувань встановлено, що міцність окремих зразків перебувала переважно в межах від 16,9 до 20,4 МПа. Для серії з 15 % вапнякового відсіву один із зразків — КУВУК100(2) — мав дефектний характер руйнування та аномально низьке значення міцності 9,83 МПа, тому згідно з вимогами ДСТУ Б В.2.7-214:2009 цей результат не враховували під час визначення міцності серії.

4. Нормативна міцність серій, визначена відповідно до ДСТУ Б В.2.7-214:2009, становить: для контрольної серії — 18,45 МПа; для серії з 5 % вапнякового відсіву — 19,60 МПа; для серії з 10 % — 18,00 МПа; для серії з 15 % — 17,89 МПа. Отже, максимальне нормативно підтверджене значення міцності одержано саме при вмісті 5 % вапнякового відсіву цукрового виробництва.

5. Порівняння одержаних результатів із даними літератури показало, що встановлена залежність має типовий для карбонатних мінеральних добавок нелінійний характер: невеликі дозування сприяють ущільненню структури цементного каменю й підвищенню міцності, тоді як за збільшення вмісту добавки

до 10 і 15 % починає переважати ефект розбавлення в'язучої системи, що супроводжується зниженням міцності.

6. Результати економічного аналізу підтвердили доцільність використання 5 % вапнякового відсіву цукрового виробництва як мінеральної добавки до бетону, що дає змогу знизити витрати цементу при збереженні належних показників міцності. Такий підхід сприяє зменшенню матеріаломісткості та підвищенню ресурсної ефективності бетонних сумішей.

7. Перспективи подальших досліджень пов'язані з уточненням оптимального дозування вапнякового відсіву, вивченням впливу його дисперсності та вологості, оцінюванням ранньої та пізньої міцності, а також дослідженням показників довговічності бетону — водопоглинання, морозостійкості, карбонізації, проникності та особливостей мікроструктуроутворення.

**БІБЛІОГРАФІЯ**

1. Wang D., Shi C., Farzadnia N., Shi Z., Jia H., Ou Z. A review on use of limestone powder in cement-based materials: mechanism, hydration and microstructures. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 181. P. 659–672.
2. Kim Y. J., Choi Y. W., Lachemi M. Evaluation of the Efficiency of Limestone Powder in Concrete and the Effects on the Environment. *Sustainability*. 2018. Vol. 10(2). Art. 550.
3. Qi J., Jiang L., Zhu M., Mu C., Li R. Experimental study on the effect of limestone powder content on the dynamic and static mechanical properties of seawater coral aggregate concrete (SCAC). *Materials*. 2023. Vol. 16(9). Art. 3381.
4. Li C., Jiang L. Utilization of limestone powder as an activator for early-age strength improvement of slag concrete. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 253. Art. 119257.
5. Chang X., He T., Niu M., Zhao L., Wang L., Wang Y. Influence of limestone powder mixing method on properties of manufactured sand concrete. *Case Studies in Construction Materials*. 2024. Vol. 20. Art. e02996.
6. Sun J., Chen Z. Influences of limestone powder on the resistance of concretes to the chloride ion penetration and sulfate attack. *Powder Technology*. 2018. Vol. 338. P. 725–733.
7. Tennis P. D. State-of-the-Art Report on Use of Limestone in Cements at Levels of up to 15%. American Cement Association, 2024.
8. El Fadili H., Ait-Khouia Y., Benzaazoua M., Taha Y. Symbiotic effects of clayey phosphate sludge and sugar lime on the engineering properties of binary and ternary alkali-activated materials. *Construction and Building Materials*. 2025. Vol. 482. Art. 141657.
9. Bahmani H., Mostofinejad D. Sustainable construction solutions: The role of sugar factory lime waste-activated slag in high-performance concrete. *Ain Shams Engineering Journal*. 2025. Vol. 16(3). Art. 103315.

10. Murali G., Wong L. S., Ramkumar V. R., Abid S. R., Karthik S. From waste to resource recycled lime sludge: Sustainable low clinker cementitious binder, a comprehensive study on hydration, strength of concrete. *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 86. Art. 108935.

11. Li H., Xu W., Yang X., Wu J. Preparation of Portland cement with sugar filter mud as lime-based raw material. *Journal of Cleaner Production*. 2014. Vol. 66. P. 107–112.

12. Jantasuto O., Wiwattanachang N. Effects of sugar in calcium carbonate (CaCO<sub>3</sub>) sludge on properties of concrete. *UTK Research Journal*. 2020. Vol. 14(2). P. 128–135.

13. Kropyvnytska T., Heviuk I., Stekhna R., Rykhlitska O., Deschenko L. Effect of limestone powder on the properties of blended Portland cements. *Theory and Building Practice*. 2021. Vol. 3(1). P. 35–41.

14. Rykhlitska O., Kropyvnytska T. Effect of polycarboxylate superplasticizers on the properties of ready-mix concrete. *Theory and Building Practice*. 2022. Vol. 4(1). P. 43–49.

15. Бондар А. В. Ефективність використання карбонатних наповнювачів з відходів виробництва для сухих будівельних сумішей та поризованих розчинів на їх основі: кваліфікаційна робота магістра. Вінниця: Вінницький національний технічний університет, 2020. 83 с.

16. Очеретний В. П., Ковальський В. П., Бондар А. В. Використання поверхнево-активних речовин як поризуючої добавки до сухих будівельних сумішей. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2011. № 1. С. 63–67.

17. Регіональний план управління відходами Тернопільської області на період до 2030 року. Тернопіль: Тернопільська обласна державна адміністрація, 2020. 466 с.

18. ASTM C595/C595M-24. Standard Specification for Blended Hydraulic Cements. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2024.

19. American Cement Association. Cement & Concrete FAQ: Portland-limestone cement (PLC). Skokie, IL: American Cement Association, 2024.

20. ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 36 с.

21. Gharieb M., Rashad A. M. An initial study of using sugar-beet waste as a cementitious material. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 250. Art. 118843.

22. Vashistha P., Kumar V., Singh S. K., Dutt D., Tomar G., Yadav P. Valorization of paper mill lime sludge via application in building construction materials: A review. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 211. P. 371–382.

23. Zhang Z., Wang Q., Chen H. Properties of high-volume limestone powder concrete under standard curing and steam-curing conditions. *Powder Technology*. 2016. Vol. 301. P. 16–25.

24. Zeng H., Li Y. Effect of waste stone powder on compressive strength and pore structure of concrete in extreme low temperature and complex environment. *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 95. Art. 110108.

25. Про охорону праці: Закон України від 14 жовтня 1992 р. № 2694-ХІІ. Верховна Рада України.

26. ДБН А.3.2-2-2009. Система стандартів безпеки праці. Охорона праці і промислова безпека у будівництві. Основні положення. Київ: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2012. Статус: чинний.

27. Правила пожежної безпеки в Україні : затв. наказом Міністерства внутрішніх справ України від 30.12.2014 № 1417, зареєстр. в Міністерстві юстиції України 05.03.2015 за № 252/26697.

28. Кодекс цивільного захисту України : Кодекс України; Закон, Кодекс від 02.10.2012 № 5403-VI // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. ([zakon.rada.gov.ua](http://zakon.rada.gov.ua)).

29. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. Київ: Мінрегіон України, 2017. Чинний від 2017 р.

30. ДБН В.1.2-4:2019. Інженерно-технічні заходи цивільного захисту. Київ: Мінрегіон України, 2019.